

Tabela 19 – Rendimento do CFRP no reforço ao corte.

Vigas	F_{max}^* (kN)	$\epsilon_{CFRP}^{ext.1}$ (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{ext.2}$ (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{ext.3}$ (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{ext.4}$ (‰)	ϵ_{CFRP}^{med} (‰)	$\epsilon_{CFRP}^{med} / \epsilon_{fu}$ (%)
2S-3LV	316 (1)	-	7.84	3.67	-	5.76	33
2S-5LV**	357 (42)	-	2.85	1.29	13.88	6.01	34
2S-8LV***	396 (81)	6.65 (6.71)	6.94 (7.17)	6.91 (5.50)	4.26 (3.08)	6.19 (5.62)	35 (32)
2S-3LI45	328 (13)	8.86	8.83	10.76	5.20	8.41	48
2S-5LI45	384 (69)	7.58	8.47	5.67	3.83	6.39	36
2S-8LI45	382 (67)	2.60	5.95	4.76	2.15	3.87	22
2S-3LI60***	374 (59)	-	11.08 (11.11)	9.75 (9.72)	2.28 (2.16)	7.70 (7.66)	44 (43)
2S-5LI60***	392 (77)	7.41 (7.75)	8.87 (8.96)	8.36 (8.46)	-	8.21 (8.39)	46 (47)
2S-7LI60	406 (91)	4.70	8.72	7.31	4.59	6.33	36

* Entre parêntesis está registado o acréscimo de carga proporcionado pelo reforço de CFRP. ** O sistema de aquisição não permitiu uma leitura superior a 13.88%. *** Os valores das extensões entre parêntesis são referentes à carga que originou a máxima extensão no CFRP (391 kN na viga 2S-8LV, 372 kN na viga 2S-3LI60 e 390 kN na viga 2S-5LI60).

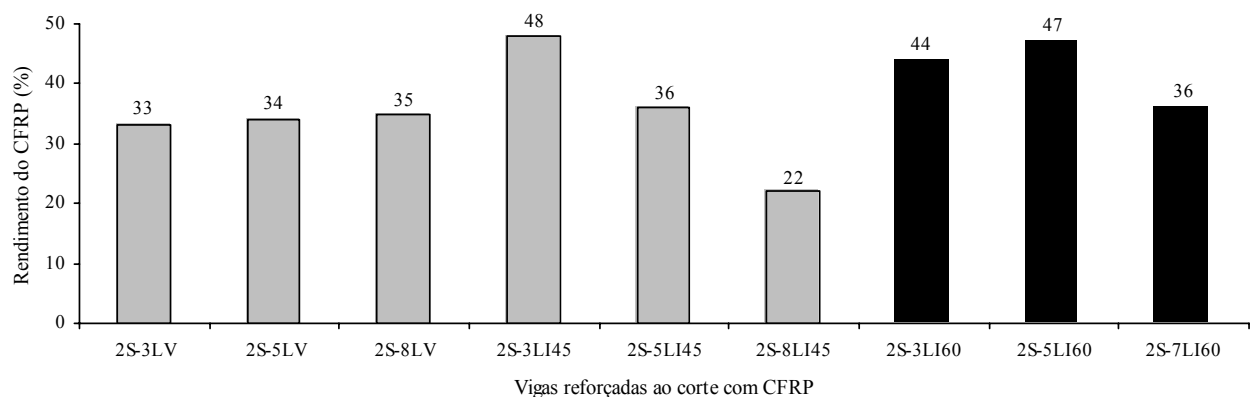


Figura 89 – Rendimento do CFRP para as nove soluções de reforço testadas.

A análise dos dados da Tabela 19 e da Figura 89 permite constatar que o rendimento do reforço de CFRP, em termos da mobilização da sua capacidade máxima resistente, variou entre os 22%, da solução de oito laminados de CFRP inclinados a 45° (viga 2S-8LI45), e os 48% da solução com três laminados de CFRP inclinados a 45° (viga 2S-3LI45). Próximo do nível máximo do rendimento obtido estiveram as soluções correspondentes às vigas 2S-3LI60 (três laminados de CFRP inclinados a 60°) e 2S-5LI60 (cinco laminados de CFRP inclinados a 60°). O baixo nível de rendimento do CFRP da viga 2S-8LI45 está em sintonia com o ganho de resistência proporcionado por esta solução de reforço. Com efeito, tal como se viu anteriormente, a capacidade de carga máxima da viga 2S-8LI45 foi de 382 kN, sendo ligeiramente inferior à registada pela viga 2S-5LI45 (384 kN). Relembre-se que a solução de reforço da viga 2S-8LI45 continha mais três laminados que a solução de reforço da viga 2S-5LI45.

De um modo geral, às vigas com maior percentagem de reforço esteve associado o menor desempenho do CFRP. Este facto é devido ao modo de rotura das referidas vigas, que foi o “spalling” das paredes “betão de recobrimento + CFRP”. Os casos de melhor rendimento de CFRP estiveram associados ao modo de rotura por “pull out” dos laminados de CFRP. Foi o que se passou nas vigas 2S-3LI45, 2S-3LI60 e 2S-5LI60. Deste modo, e considerando o que se disse anteriormente em relação às soluções de CFRP de menor rendimento, verifica-se que o modo de ruína por “spalling” conduz a menores aproveitamentos do CFRP, comparativamente com o registado com o modo de rotura por “pull out”. O primeiro dos modos de rotura referidos ocorreu nas vigas com a maior percentagem de CFRP e o segundo modo de rotura ocorreu em vigas com menores percentagens de CFRP.

Em termos médios a solução com laminados inclinados a 60° foi a que conduziu a uma melhor rentabilidade do reforço (cerca de 42%). As soluções de laminados verticais e de laminados inclinados a 45° conduziram, em termos médios, a graus de eficácia semelhantes, cerca de 35%. No entanto, a solução de reforço com laminados a 45° apresentou uma grande variabilidade de valores. Na Figura 89 verifica-se que nenhuma das soluções de reforço testadas, independentemente da orientação e da percentagem de CFRP, garantiu um rendimento do CFRP superior a 50%.

O valor médio do rendimento do CFRP das várias soluções de reforço ao corte testadas foi de 37.2%, ao qual corresponde uma extensão no CFRP de 6.6‰. Este valor é ligeiramente superior ao valor que Dias e Barros (2004-b) propuseram (5.9‰) para a extensão máxima admissível no CFRP, quando este é aplicado no reforço ao corte de vigas de betão armado usando a técnica NSM com laminados. Refira-se que o valor de 5.9‰ foi avançado tendo em consideração os resultados experimentais de ensaios de “pull out” à flexão realizados para avaliar a aderência betão-adesivo-laminado de CFRP, quando este é aplicado usando a técnica NSM (Sena-Cruz e Barros, 2004).

Na Tabela 20 apresentam-se, para cada uma das vigas reforçadas ao corte com CFRP, os valores da carga máxima regista e respectivo acréscimo de carga proporcionado pelo reforço de CFRP, assim como, os valores das extensões registadas, para o nível de carga máximo, nos três extensómetros que foram colados no estribo de aço instrumentado ($\varepsilon_{estribo}^{ext.1}$, $\varepsilon_{estribo}^{ext.2}$ e $\varepsilon_{estribo}^{ext.3}$). Para os casos em que a máxima extensão no estribo de aço não correspondeu à carga máxima da viga, na Tabela 20 são apresentados, entre parêntesis, os valores das extensões nos referidos três extensómetros correspondentes à carga para a qual se registou a extensão máxima no estribo de aço. Na Tabela 20, também, são identificados os estribos para os quais houve uma inversão no sentido da resposta carga vs extensão no estribo de aço (ver exemplo na Figura 67), os estribos em que o aço entrou em cedência e os estribos que atingiram a rotura.

A análise dos dados da Tabela 20 permite verificar que, em todas as soluções de reforço testadas, o aço dos estribos instrumentados entrou em cedência antes das vigas atingirem a sua

capacidade de carga máxima. A extensão de cedência do aço foi cerca dos 4.0‰. Das soluções testadas, apenas a referente à da viga 2S-3LV (três laminados de CFRP na vertical em cada face do menor vão de corte), é que não garantiu a rotura dos estribos após a carga máxima dos modelos. Com a excepção do estribo instrumentado referente à viga 2S-7LI60 todos os outros atingiram a rotura, uns apenas numa secção outros em duas secções, conforme foi ilustrado na secção 3.3 deste relatório.

Outro aspecto a realçar nos resultados referentes à extensometria colocada nos estribos de aço diz respeito ao facto de num grande número de extensómetros (os mais solicitados) se ter verificado uma inversão na resposta carga vs extensão na secção do estribo de aço. Tal como já foi referido anteriormente, este facto pode estar associado a eventuais escorregamentos do estribo. Refira-se que este tipo de comportamento foi também verificado em alguns extensómetros colados em laminados (ver exemplo na Figura 50).

Tabela 20 – Extensões no estribo de aço instrumentado.

Vigas	F_{max} (kN)*	$\epsilon_{estribo}^{ext.1}$ (‰)	$\epsilon_{estribo}^{ext.2}$ (‰)	$\epsilon_{estribo}^{ext.3}$ (‰)	Inversão da resposta	Cedência do aço do estribo	Rotura do estribo
2S-3LV	316 (1)	-	-	8.85 (11.96)	Sim	Sim	Sim
2S-5LV	357 (42)	-	-	10.74	Não	Sim	Sim
2S-8LV**	396 (81)	3.16 (3.22)	3.92 (6.72)	6.67 (11.12)	Sim	Sim	Sim
2S-3LI45	328 (13)	-	-	4.05 (12.27)	Sim	Sim	Sim
2S-5LI45	384 (69)	-	-	1.18 (6.88)	Sim	Sim	Sim
2S-8LI45	382 (67)	5.89	-	-	Não	Sim	Sim
2S-3LI60**	374 (59)	2.05 (1.98)	3.78 (4.62)	7.54 (11.55)	Sim	Sim	Sim
2S-5LI60**	392 (77)	4.17 (2.71)	-	8.87 (11.78)	Sim	Sim	Sim
2S-7LI60	406 (91)	13.76	9.02	-	Não	Sim	Não

* Entre parêntesis está registado o acréscimo de carga proporcionado pelo reforço de CFRP. ** Os valores de extensões entre parêntesis referem-se às que foram registadas para a carga que originou a máxima extensão no CFRP (315 kN na viga 2S-3LV, 391 kN na viga 2S-8LV, 297 kN na viga 2S-3LI45, 325 kN na viga 2S-5LI45, 350 kN na viga 2S-3LI60 e 300 kN na viga 2S-5LI60).

3.5 - Efeito da percentagem de CFRP

Nesta secção será analisado o efeito da percentagem de CFRP (ρ_f) na eficácia do reforço ao corte de vigas de betão armado, por intermédio da técnica da inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento, a partir dos resultados obtidos na campanha de ensaios realizada. A percentagem de reforço ao corte de CFRP (ρ_f) foi quantificada usando a seguinte expressão:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot a_f \cdot b_f}{b_w \cdot s_f \cdot \text{sena}} \times 100 \quad (7)$$

Na expressão anterior a_f e b_f são as dimensões da secção transversal do laminado, b_w é a largura da alma da viga, s_f é o espaçamento dos laminados e α é a inclinação dos laminados relativamente ao eixo da viga.

Na Figura 90 apresentam-se as respostas, carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, da viga de referência sem reforço de CFRP (2S-R) e das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (2S-3LV, 2S-5LV e 2S-8LV). Estas respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente. Para as vigas anteriormente referidas, na Figura 90 também está representada a relação Δ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga (Δ Carga = Carga da viga reforçada – Carga da viga não reforçada).

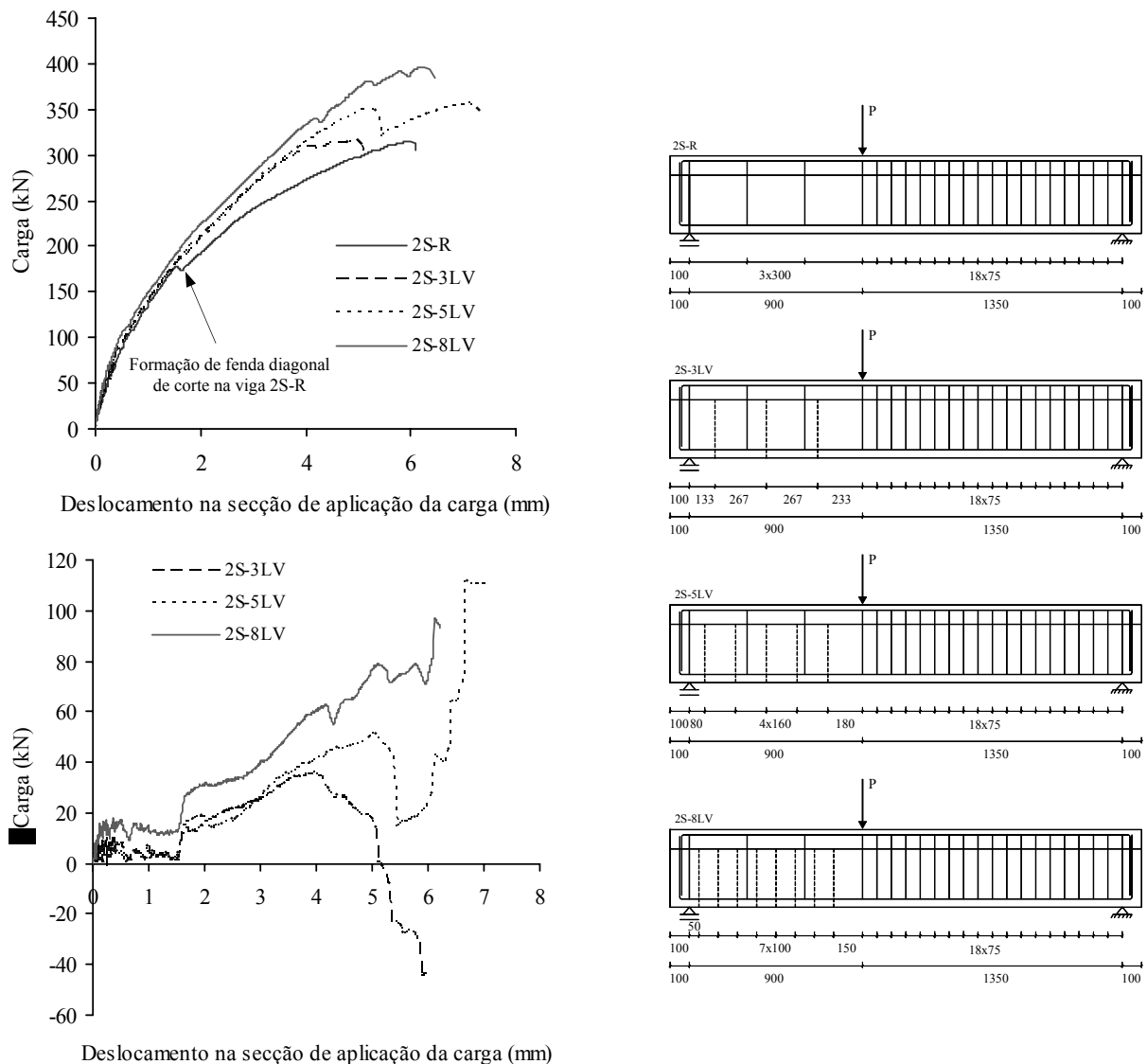


Figura 90 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados verticais (rigidez e capacidade máxima de carga).

Da análise da Figura 90 verifica-se que a presença de CFRP usando a solução de laminados verticais proporcionou acréscimos de rigidez e, com a excepção do caso da viga 2S-3LV, acréscimos da capacidade máxima resistente na rotura. O acréscimo de rigidez provocado pelo CFRP foi evidente a partir do momento em que começaram a surgir as fendas diagonais de corte. Os ganhos de rigidez e de capacidade de carga máxima aumentaram à medida que aumentou a percentagem de CFRP, embora não de uma forma proporcional. O ganho de rigidez das soluções com três e cinco laminados de CFRP foi semelhante, até uma flecha na secção de aplicação da carga de 4 mm, altura em que a viga 2S-3LV registou uma quebra no aumento da sua capacidade de carga. Das três soluções com laminados de CFRP verticais, a que garantiu maior incremento de rigidez foi a solução que continha a maior percentagem de reforço aplicada (viga 2S-8LV). Tal como se pode constatar na Figura 90, a partir do momento em que o reforço de CFRP foi activado, pelo aparecimento das fendas diagonais de corte, até ao momento em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima de carga, o aumento do valor de $\Delta Carga$ apresentou um andamento muito semelhante para as várias percentagens de reforço. Outro aspecto que se verifica na análise da Figura 90 é que para as vigas com CFRP não ocorreu uma quebra momentânea no aumento da capacidade de carga resistente, tal como se verificou na viga sem reforço 2S-R (cerca dos 177 kN) por ocasião da ocorrência da fenda diagonal de corte.

Em termos de estado limite último, e tendo como base a carga máxima da viga de referência 2S-R, as soluções de reforço referentes à inserção na vertical de três laminados ($\rho_f = 0.06\%$), cinco laminados ($\rho_f = 0.1\%$) e oito laminados ($\rho_f = 0.16\%$) proporcionaram acréscimos de carga máxima de 0.3%, 13% e 25%, respectivamente. Na Figura 90 é visível, tal como já se tinha constatado na secção 3.2, o facto da presença do reforço de CFRP não introduzir benefícios em termos de capacidade deformacional na rotura.

O padrão de fendilhação registado no final do ensaio das vigas 2S-3LV, 2S-5LV e 2S-8LV está ilustrado na Figura 91, verificando-se que aquele foi bastante mais difuso e repartido do que o verificado na viga 2S-R (ver Figura 39). Estas diferenças, quer em termos globais, como ao nível do menor dos vãos de corte onde o reforço de CFRP foi executado e onde se registou a rotura das vigas, tornam-se mais evidentes com o aumento da percentagem de CFRP.

A comparação da zona de rotura da viga de referência 2S-R e das vigas reforçadas ao corte com laminados verticais está ilustrada nas fotografias da Figura 92. A sua análise permite afirmar:

i) Com o aumento da quantidade de CFRP a superfície de rotura ficou muito mais bem demarcada. Para a viga com a menor percentagem de CFRP (2S-3LV) a fenda de rotura de corte evidenciou-se menos do que a verificada na viga com a percentagem de CFRP intermédia (2S-5LV). Ao contrário do que se passou nestas vigas, na que foi reforçada com oito laminados de CFRP (2S-8LV) não apareceu uma fenda que se destacasse visivelmente das restantes, existindo sim uma zona demarcada

por duas fendas de corte, na qual eram visíveis mais fendas de corte (zona com betão bastante danificado). Este facto, associado à percentagem máxima de CFRP, ocorreu devido ao modo de rotura da viga, que foi o “spalling” da parede “betão de recobrimento + CFRP”.

ii) A presença de CFRP altera a inclinação da fenda de rotura de corte. Concretamente, verificou-se que esta, em relação ao eixo da peça, foi de 45°, 40° e 36°, respectivamente, para as vigas 2S-3LV, 2S-5LV e 2S-7LV, ou seja, constata-se que a inclinação da fenda de rotura de corte diminuiu com o aumento da percentagem de CFRP. No entanto, todos os valores referidos anteriormente são superiores ao que foi registado na viga de referência 2S-R (34°). Os valores da inclinação das fendas de rotura de corte entre os 36° e os 45° comprovam a não ortogonalidade de uma solução de reforço com laminados verticais em relação às potenciais fendas diagonais de corte.

iii) Na viga reforçada com três laminados de CFRP apenas um deles (1/3, um em três) foi solicitado pela fenda de rotura de corte, enquanto na viga com cinco laminados, dois deles foram atravessados pela fenda de rotura de corte (2/5, dois em cinco). Em relação à viga com oito laminados em cada face, embora cinco laminados contribuíssem para fazer frente às fendas de corte, o destacamento das paredes “betão de recobrimento + CFRP” impediu um melhor aproveitamento do CFRP (ver secção 3.4), uma vez que os laminados acabaram por não sofrer “pull-out” mas sim foram parte integrante da parede que se destacou. Esta constatação indicia existir uma percentagem de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado, a partir da qual, o acréscimo de carga proporcionado pelo reforço pode ser insignificante. Por outro lado, o resultado da viga 2S-3LV (não houve ganho de resistência na rotura), associado ao facto de apenas um laminado ter atravessado a fenda diagonal de corte indicia que devem existir pelo menos dois laminados a atravessar a fenda de rotura de corte para que a solução de reforço seja minimamente eficaz (Chen e Teng, 2003-a e Chen e Teng, 2003-b). Por outras palavras, deve existir um limite para o espaçamento máximo entre laminados de CFRP.



Figura 91 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados verticais (padrão de fendilhação final).

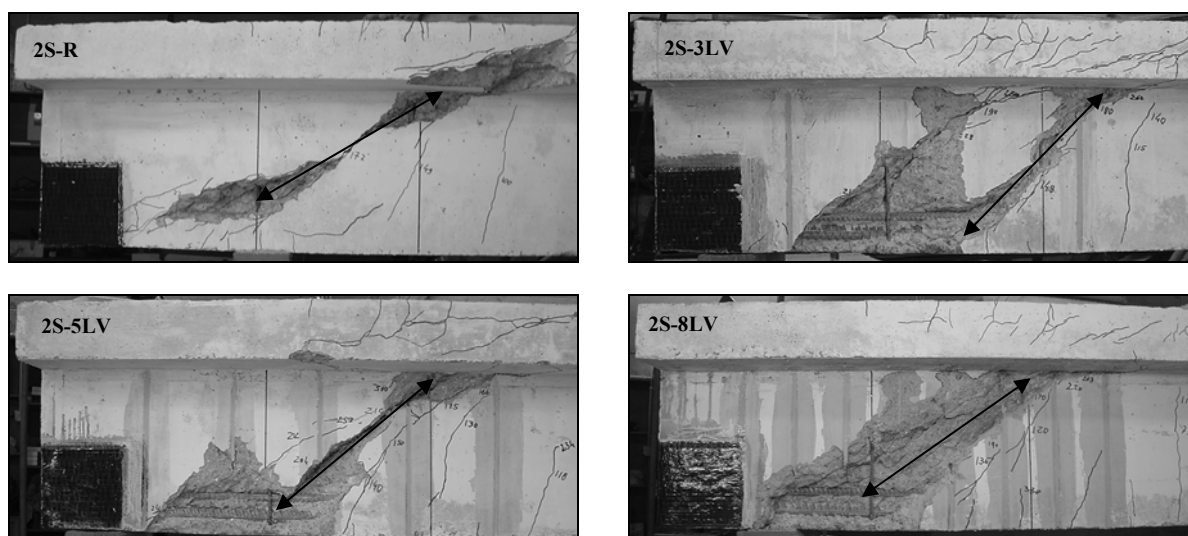


Figura 92 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados verticais (inclinação da fenda de rotura de corte).

Na Figura 93 apresentam-se as respostas, carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, da viga de referência sem reforço de CFRP (2S-R) e das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (2S-3LI45, 2S-5LI45 e 2S-8LI45). Estas respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente. Para as vigas anteriormente referidas, na Figura 93 também está representada a relação Δ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

Da análise da Figura 93 verifica-se que a presença de CFRP usando a solução de laminados inclinados a 45° proporcionou acréscimos de rigidez e de capacidade máxima resistente na rotura. O acréscimo de rigidez provocado pelo CFRP foi evidente a partir do momento em que começaram a surgir as fendas diagonais de corte. Quer em termos de rigidez, como em termos de capacidade máxima de carga na rotura, o incremento da quantidade de reforço de três para cinco laminados proporcionou aumentos mais significativos do que os que se verificaram quando a quantidade de reforço aumentou de cinco para oito laminados. A um aumento da quantidade de CFRP associou-se sempre um aumento de rigidez. Este tipo de evolução não se verificou em termos de capacidade máxima de carga na rotura. Com efeito, a solução com oito laminados conduziu a uma capacidade máxima de carga na rotura ligeiramente inferior ($F_{max}^{2S-8LI45} = 382$ kN) à proporcionada pela solução de cinco laminados ($F_{max}^{2S-5LI45} = 384$ kN).

Assim, em termos de estado limite último, e tendo como base a carga máxima da viga de referência 2S-R, verificou-se que a solução com a menor percentagem de CFRP (viga 2S-3LI45 com $\rho_f = 0.06\%$) conduziu, de entre as vigas reforçadas com CFRP a 45°, ao menor incremento de

capacidade de carga, que foi de 4%, enquanto para as outras percentagens de reforço o aumento da capacidade máxima resistente foi de 22% (viga 2S-5LI45 com $\rho_f = 0.1\%$) e 21% (viga 2S-8LI45 com $\rho_f = 0.16\%$). Na Figura 93 é visível, tal como já se tinha constatado na secção 3.2, o facto da presença do reforço de CFRP não introduzir benefícios em termos de capacidade deformacional na rotura.

Outro aspecto que é possível verificar na análise da Figura 93 é que para as vigas reforçadas com as maiores percentagens de CFRP (viga 2S-5LI45 com $\rho_f = 0.1\%$ e viga 2S-8LI45 com $\rho_f = 0.16\%$) não ocorreu uma quebra momentânea do aumento da capacidade resistente, tal como se verificou na viga 2S-R, para uma carga de cerca de 177 kN, e na viga 2S-3LI45, para uma carga de 190 kN, altura em que se formou uma fenda diagonal de corte nas referidas vigas. Este facto permite constatar a influência da percentagem de CFRP no controle do padrão de fendilhação dos modelos reforçados.

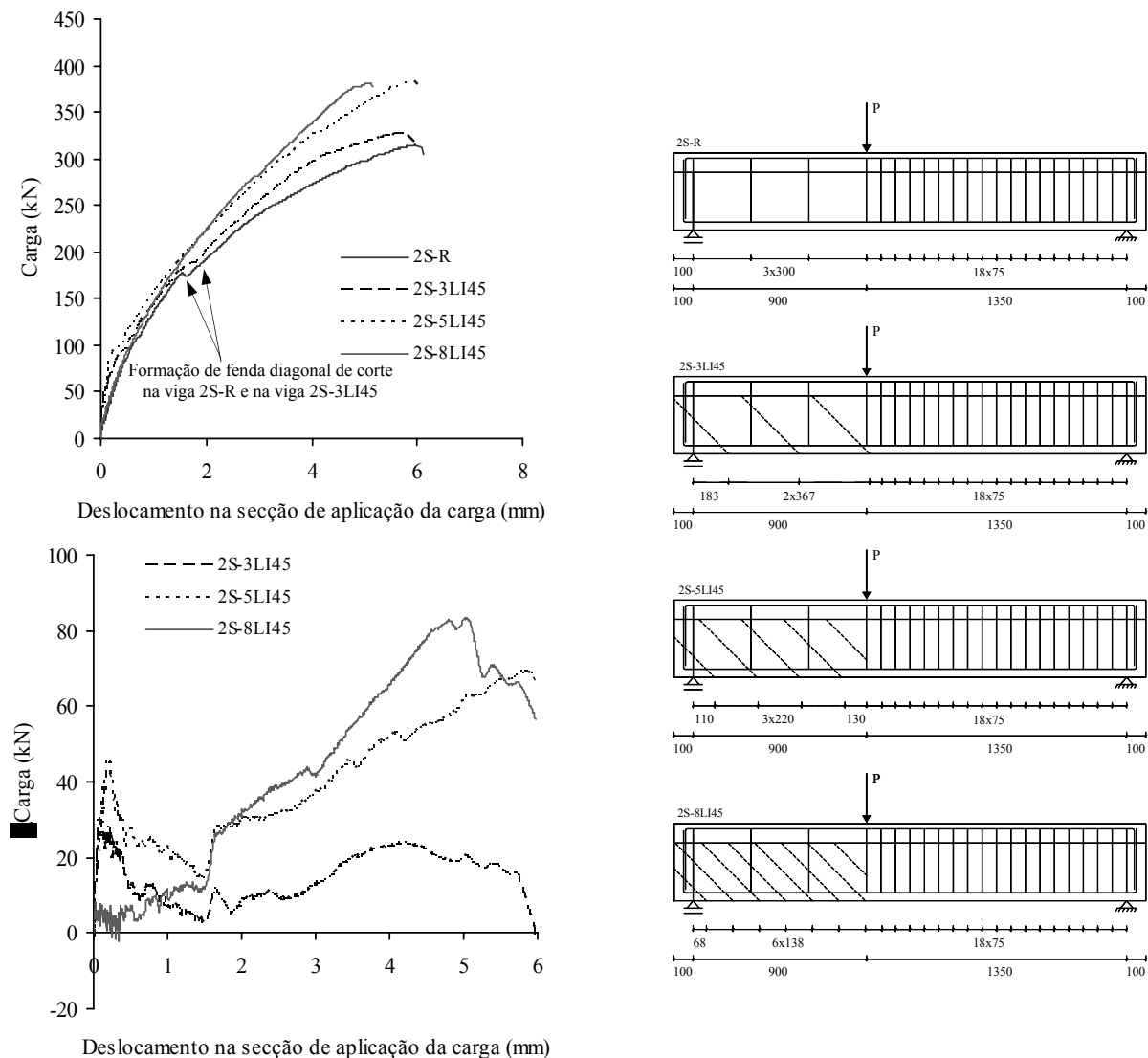


Figura 93 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados inclinados a 45° (rigidez e capacidade máxima de carga).

O padrão de fendilhação registado no final do ensaio das vigas 2S-3LI45, 2S-5LI45 e 2S-8LI45 está registado na Figura 94, verificando-se que foi bastante mais difuso e repartido do que o verificado na viga 2S-R (ver Figura 39). Estas diferenças, quer em termos globais, como ao nível do menor dos vão de corte onde o reforço de CFRP foi executado e onde se registou a rotura das vigas, tornam-se mais evidentes com o aumento da percentagem de CFRP.



Figura 94 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados inclinados a 45° (padrão de fendilhação final).

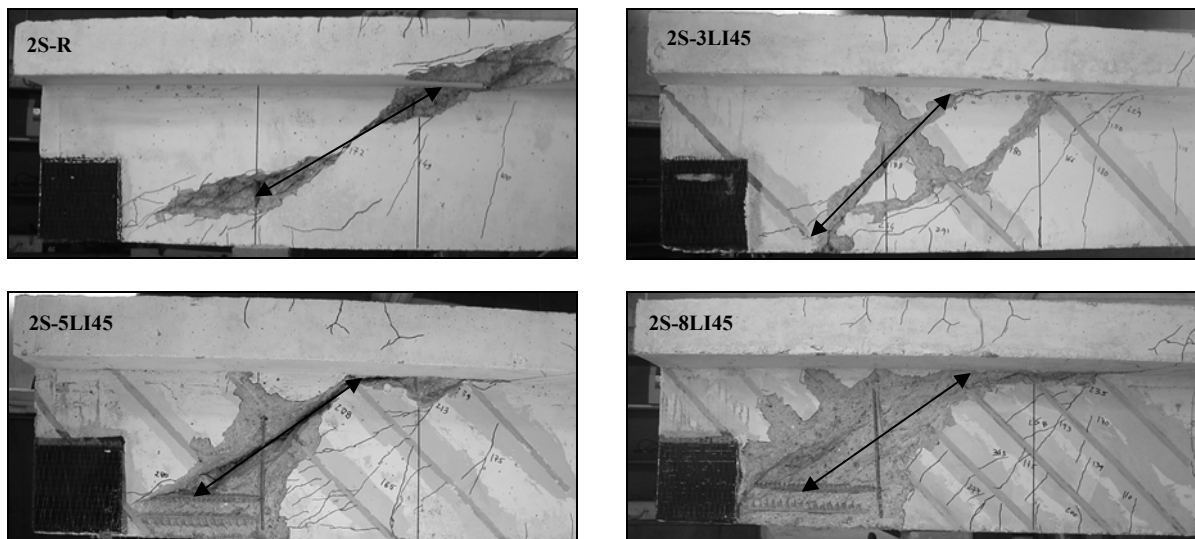


Figura 95 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados inclinados a 45° (inclinação da fenda de rotura de corte).

A comparação da zona de rotura da viga de referência 2S-R e das vigas reforçadas ao corte com laminados inclinados a 45° está ilustrada nas fotografias da Figura 95. A sua análise permite verificar os seguintes aspectos:

- i) Com o aumento da quantidade de CFRP a superfície de rotura ficou muito mais bem demarcada. Para a viga com a menor percentagem de CFRP (2S-3LI45) a fenda de rotura de corte evidenciou-se

menos do que a verificada na viga com a percentagem de CFRP intermédia (2S-5LI45). Ao contrário do que se passou nestas vigas, na que foi reforçada com oito laminados de CFRP (2S-8LI45) não apareceu uma fenda que se destacasse visivelmente das restantes, existindo sim uma zona demarcada por duas fendas de corte, na qual eram visíveis mais fendas de corte (zona com betão bastante danificado). Este facto, associado à percentagem máxima de CFRP, ocorreu devido ao modo de rotura da viga, que foi o “spalling” da parede “betão de recobrimento + CFRP”. Esta constatação já tinha sido feita para o caso do reforço com laminados orientados a 90°.

ii) A presença de CFRP altera a inclinação da fenda de rotura de corte. Enquanto na viga de referência 2S-R a inclinação da fenda de rotura de corte foi de 34°, para a viga 2S-3LI45 foi 45° e para as vigas 2S-5LI45 e 2S-8LI45 foi de 36°. Assim, verifica-se que a inclinação da fenda de rotura de corte não foi uniforme para as três percentagens de CFRP. Em relação à inclinação que os laminados de CFRP apresentavam, a fenda de rotura de corte surgiu praticamente ortogonal no caso da viga com a menor percentagem de CFRP, o que não se verificou com as percentagens mais elevadas de CFRP.

iii) Comparativamente com o registado nas vigas reforçadas ao esforço transversal com CFRP, na viga de referência 2S-R a fenda de rotura de corte alcançou a ligação alma/banzo numa secção mais próxima do ponto de aplicação da carga. O facto de a fenda de corte atingir a ligação alma/banzo numa secção mais afastada da secção de aplicação da carga é uma vantagem introduzida pelo reforço, pois a fenda terá que vencer um maior caminho, na referida ligação, até chegar ao ponto de aplicação da carga.

iv) Na viga reforçada com três laminados de CFRP apenas um deles (1/3, um em três) foi solicitado pela fenda de rotura de corte, enquanto na viga com cinco laminados, dois deles foram atravessados pela fenda de corte (2/5, dois em cinco). Em relação à viga com oito laminados em cada face, embora a maior parte dos laminados contribuíssem para fazer frente às fendas de corte, o destacamento das paredes “betão de recobrimento + CFRP” impediu um melhor aproveitamento do CFRP (ver secção 3.4), uma vez que os laminados acabaram por não sofrer “pull-out” mas sim foram parte integrante da parede que se destacou. Esta constatação reforça o que já anteriormente foi dito em relação à existência de uma percentagem máxima de CFRP, a partir da qual, não existe um desempenho do CFRP optimizado. Por outro lado, o resultado da solução de reforço da viga 2S-3LI45 (ganho de resistência na rotura inferior a 5% - ver Tabela 8) confirma o que se referiu relativamente ao caso da viga 2S-3LV, ou seja, deve existir um limite para o espaçamento máximo entre laminados de CFRP.

Na Figura 96 apresentam-se as respostas, carga *vs* deslocamento na secção de aplicação da carga, da viga de referência sem reforço de CFRP (2S-R) e das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 60° (2S-3LI60, 2S-5LI60 e 2S-7LI60). Estas

respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente. Para as vigas anteriormente referidas, na Figura 96, também, está representada a relação Δ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

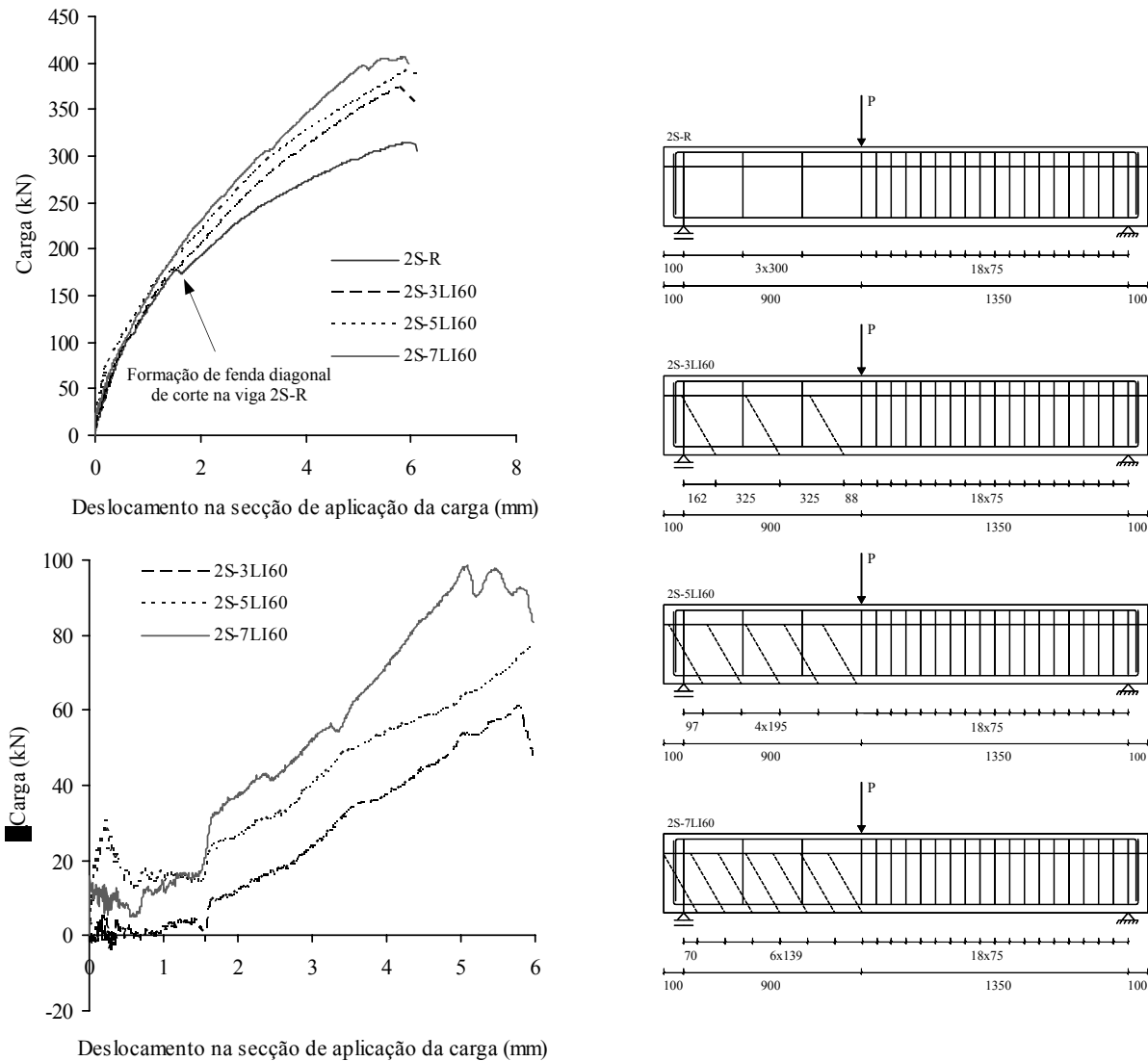


Figura 96 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados inclinados a 60° (rigidez e capacidade máxima de carga).

Da análise da Figura 96 verifica-se que a presença de CFRP usando a solução de laminados inclinados a 60° proporcionou acréscimos de rigidez e da capacidade máxima resistente na rotura. O acréscimo de rigidez provocado pelo CFRP foi evidente a partir do momento em que começaram a surgir as fendas diagonais de corte. Um aumento da quantidade de CFRP foi acompanhado por um aumento no ganho de rigidez e de capacidade de carga máxima na rotura. No entanto estes aumentos não foram proporcionais ao aumento da percentagem ρ_f . Por exemplo, em termos de carga máxima na rotura, as soluções com três laminados ($\rho_f = 0.06\%$), cinco laminados ($\rho_f = 0.09\%$) e sete laminados

($\rho_f = 0.13\%$) proporcionaram acréscimos de 19%, 24% e 29%, respectivamente. Na Figura 96 é visível, tal como já se tinha constatado na secção 3.2, o facto da presença do reforço de CFRP não introduzir benefícios em termos de capacidade deformacional na rotura.

Outro aspecto que é possível verificar na análise da Figura 96 é que para as vigas reforçadas com as maiores percentagens de CFRP (viga 2S-5LI60 com $\rho_f = 0.09\%$ e viga 2S-7LI60 com $\rho_f = 0.13\%$) não ocorreu uma quebra momentânea do aumento da capacidade resistente, tal como se verificou na viga 2S-R, para uma carga de cerca de 177 kN, e na viga 2S-3LI60, para uma carga de 176 kN, altura em que se formou uma fenda diagonal de corte nas referidas vigas. Este facto, e indo ao encontro do que se referiu aquando da análise das vigas com reforço a 45° , permite constatar a influência da percentagem de CFRP no controle do padrão de fendilhação dos modelos reforçados.

O padrão de fendilhação registado no final do ensaio das vigas 2S-3LI60, 2S-5LI60 e 2S-7LI60 está registado na Figura 97, verificando-se que foi bastante mais difuso e repartido do que o verificado na viga 2S-R (ver Figura 39). Estas diferenças, quer em termos globais, como ao nível do menor dos vão de corte onde o reforço de CFRP foi executado e onde se registou a rotura das vigas, tornam-se mais evidentes com o aumento da percentagem de CFRP.



Figura 97 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados inclinados a 60° (padrão de fendilhação final).

A comparação da zona de rotura da viga de referência 2S-R e das vigas reforçadas ao corte com laminados inclinados a 60° está ilustrada nas fotografias da Figura 98. A sua análise permite verificar os seguintes aspectos:

i) Tal como se verificou na análise das vigas com reforço a 90° e a 45° , com o aumento da quantidade de CFRP a superfície de rotura ficou muito mais bem demarcada. Para a viga com a menor percentagem de CFRP (2S-3LI60) a fenda de rotura de corte evidenciou-se menos do que a verificada

na viga com a percentagem de CFRP intermédia (2S-5LI60). Ao contrário do que se passou nestas vigas, na que foi reforçada com oito laminados de CFRP (2S-7LI60) não apareceu uma fenda que se destacasse visivelmente das restantes, existindo sim uma zona demarcada por duas fendas de corte, na qual eram visíveis mais fendas de corte (zona com betão bastante danificado). Tal como já foi referido, este facto, associado à percentagem máxima de CFRP, ocorreu devido ao modo de rotura da viga que foi o “spalling” da parede “betão de recobrimento + CFRP”.

ii) A presença de CFRP altera a inclinação da fenda de rotura de corte. Concretamente, verificou-se que esta, relativamente ao eixo da peça, foi de 33°, 36° e 37°, respectivamente, para as vigas 2S-3LI60, 2S-5LI60 e 2S-7LI60, ou seja, existe uma grande uniformidade da inclinação da fenda de rotura de corte nas três percentagens de CFRP analisadas. Relembre-se que para o caso da viga 2S-R a referida inclinação foi de 34°. Em relação à inclinação que os laminados de CFRP apresentavam, a inclinação da fenda de rotura de corte foi praticamente ortogonal nas três percentagens analisadas. Esta constatação pode justificar o melhor rendimento das vigas reforçadas com laminados inclinados a 60° relativamente às soluções de laminados verticais e laminados inclinados a 45°.

iii) Embora não de uma forma tão acentuada com se verificou para a solução a 45° (ver as Figuras 95 e 98), nas vigas com reforço de CFRP a 60° a fenda de rotura de corte atingiu a ligação alma/banzo numa secção mais distante da secção de aplicação da carga, comparativamente, ao que se registou na viga não reforçada (2S-R). Este facto é vantajoso para a capacidade resistente das vigas reforçadas com CFRP pois a fenda tem que vencer um maior caminho, na referida ligação, até atingir o ponto de aplicação da carga.

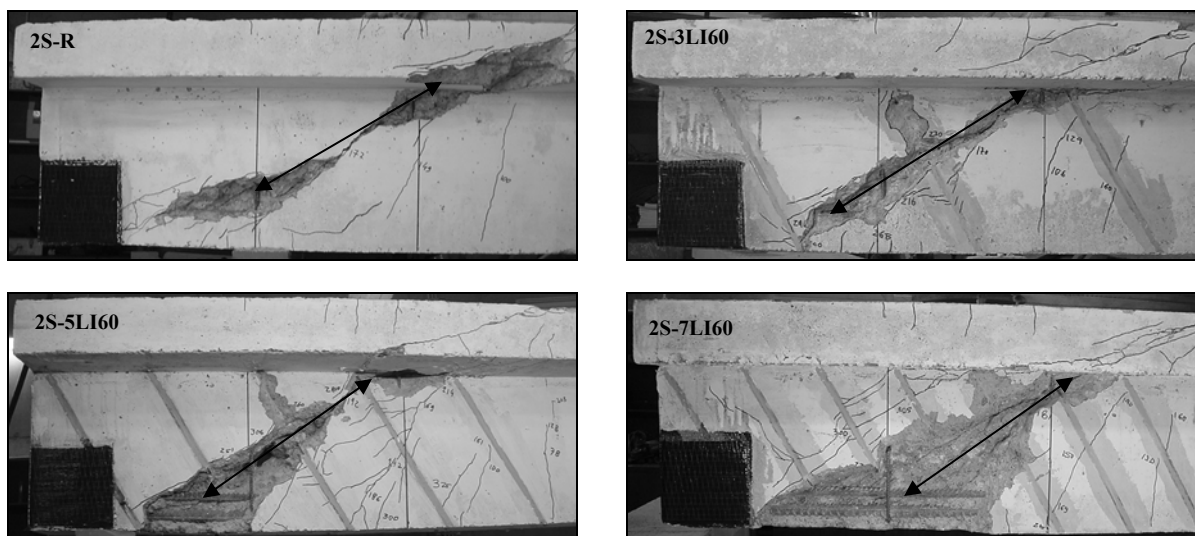


Figura 98 – Efeito da percentagem de CFRP para a solução de laminados inclinados a 60° (inclinação da fenda de rotura de corte).

iv) Na viga reforçada com três laminados de CFRP apenas um deles (1/3, um em três) foi solicitado pela fenda de rotura de corte, enquanto na viga com cinco laminados dois deles foram atravessados

pela fenda de corte (2/5, dois em cinco). Em relação à viga com sete laminados em cada face, embora a maior parte dos laminados contribuíssem para fazer frente às fendas de corte, o destacamento das paredes “betão de recobrimento + CFRP” impediu um melhor aproveitamento do CFRP (ver secção 3.4), uma vez que os laminados acabaram por não sofrer “pull-out” mas sim foram parte integrante da parede que se destacou.

Na Figura 99 apresenta-se a relação ganho de resistência vs percentagem de reforço de CFRP relativamente às nove vigas ensaiadas (três percentagens de CFRP para cada uma das três orientações de reforço analisadas). Na Figura 100 apresenta-se o ganho de resistência proporcionado pelas nove soluções de reforço testadas, divididas em três grupos (função da orientação do CFRP), de forma a melhor poder ser analisado o efeito da percentagem de reforço. O ganho de resistência refere-se à relação, em termos de percentagem, entre, a diferença das cargas máximas na rotura das vigas com e sem CFRP, e a carga máxima na rotura da viga sem CFRP. Tal como se referiu anteriormente, as percentagens de CFRP (ρ_f) usadas no reforço ao corte das vigas foram determinadas por intermédio da expressão (7).

De um modo geral é possível verificar que, independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados inclinados a 60° foi mais eficaz que a solução de laminados verticais e a solução de laminados inclinados a 45°. Em termos da menor percentagem de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.06\%$), o ganho de resistência da solução de reforço a 60° foi cerca de 4.5 vezes superior ao garantido pela solução de reforço a 45°. O ganho de resistência obtido na viga 2S-3LI60 foi 1.4 vezes superior ao garantido pela solução de reforço na vertical da viga 2S-5LV ($\rho_f = 0.1\%$) e foi cerca de 86% do rendimento obtido nas vigas 2S-5LI45 ($\rho_f = 0.1\%$) e 2S-8LI45 ($\rho_f = 0.16\%$).

Analisando os dados relativos às vigas, 2S-8LV, 2S-8LI45 e 2S-7LI60, verifica-se que o melhor desempenho da solução a 60° foi, também, bastante evidente no caso da percentagem máxima de CFRP utilizada. Com efeito, a solução de laminados inclinados a 60°, à qual correspondeu a menor percentagem máxima de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.13\%$, enquanto para as outras duas soluções tinha-se $\rho_f = 0.16\%$), proporcionou o maior aumento da capacidade de carga (29%). A solução com laminados inclinados a 45° e verticais conseguiram ganhos de resistência de 21% e 25%, respectivamente.

Algo de semelhante se passou para a percentagem intermédia de CFRP utilizada. A solução de laminados a 60° ($\rho_f = 0.09\%$) proporcionou um acréscimo de capacidade de carga de 24%, que foi superior à concebida pelas soluções de laminados verticais (13%) e laminados inclinados a 45° (22%), para as quais a percentagem de reforço ao corte (ρ_f) era de 0.1%. A carga máxima da viga 2S-5LI60 só foi ultrapassada pelas obtidas nas vigas 2S-8LV ($\rho_f = 0.16\%$) e 2S-7LI60 ($\rho_f = 0.13\%$).

A solução com laminados inclinados a 45° , com a excepção da solução de reforço referente à maior percentagem de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.16\%$), conduziu a ganhos de resistência superiores aos atingidos pela solução de laminados verticais.

Os ganhos de resistência proporcionados pelos reforços de CFRP adoptados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, o aumento da percentagem ρ_f garantiu um maior aumento da capacidade resistente da viga reforçada. A única excepção foi o caso da viga 2S-8LI45 ($\rho_f = 0.16\%$) que teve uma capacidade de carga ligeiramente inferior à da viga 2S-5LI45 ($\rho_f = 0.1\%$). Para cada uma das orientações de reforço testadas, a evolução do ganho de resistência em função da percentagem de CFRP, que se encontra representada na Figura 99, pode ser dividida em dois patamares: o primeiro correspondente às mais baixas percentagens de reforço aplicadas e o segundo correspondente às mais altas percentagens de reforço aplicadas. Verifica-se que, em todas as orientações de reforço analisadas, a inclinação do primeiro patamar foi superior à do segundo, ou seja, os ganhos de resistência tem tendência a diminuir com a percentagem de CFRP.

A solução com laminados inclinados a 45° foi a mais sensível à variação da percentagem de CFRP. Com efeito, foi das orientações testadas a que proporcionou o maior incremento, em termos de ganho de resistência, na passagem da menor percentagem de CFRP ($\rho_f = 0.06\%$) para a percentagem intermédia ($\rho_f = 0.10\%$). Ao mesmo tempo, foi a única solução de reforço, em termos de orientação de CFRP, que não teve praticamente nenhuma variação ao passar da situação da percentagem intermédia de CFRP ($\rho_f = 0.10\%$) para a percentagem máxima de CFRP ($\rho_f = 0.16\%$). Inversamente a este cenário, a solução com laminados inclinados a 60° foi a que proporcionou uma evolução da relação ganho de resistência vs percentagem de CFRP mais próxima da linearidade.

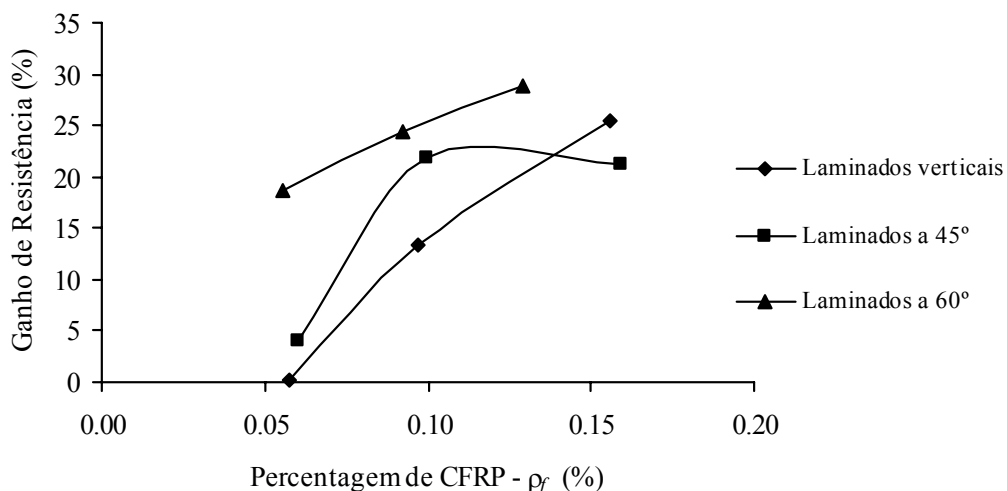


Figura 99 – Ganho de resistência vs percentagem de reforço de CFRP.

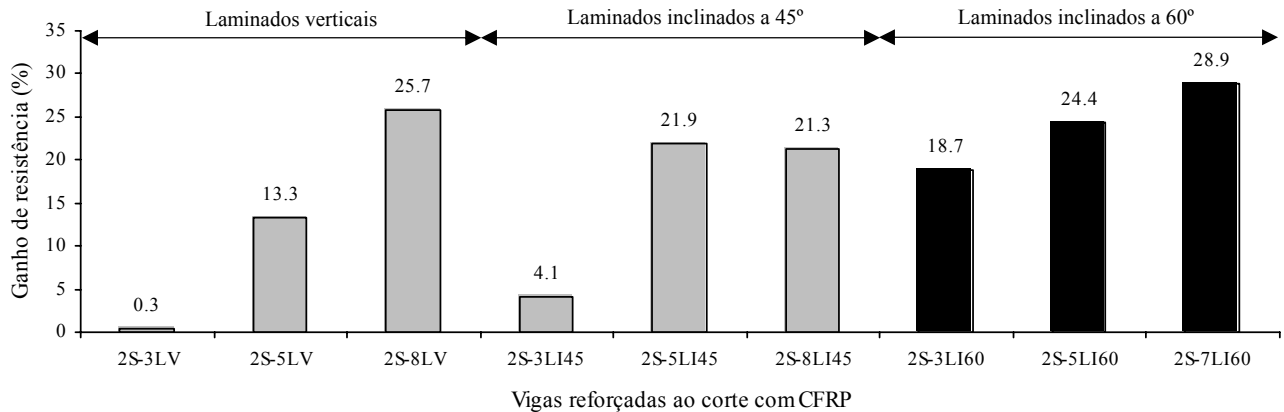


Figura 100 – Efeito da percentagem de CFRP no ganho de resistência.

Na Figura 101 apresenta-se a evolução, em função da percentagem de CFRP aplicada, da extensão média registada em cada um dos laminados instrumentados (Tabela 19). Um dos aspectos que se pode verificar na análise desta figura é a diminuição da extensão média no CFRP, quando a quantidade de reforço aumenta da percentagem intermédia para a percentagem máxima. Este facto está associado ao fenómeno de “spalling” das paredes “betão de recobrimento + CFRP” e que, por exemplo, foi bastante evidente na viga com oito laminados inclinados a 45°, onde o valor médio da extensão no CFRP foi apenas 3.87 $\mu\text{m}/\text{m}$, ou seja, cerca de 22% da extensão máxima do CFRP (ϵ_{fu}).

Para a solução de laminados inclinados a 45° verificou-se uma diminuição da mobilização da capacidade resistente do CFRP com o aumento da percentagem de laminados. No caso das soluções de reforço de CFRP correspondentes a laminados verticais e inclinados a 60°, a evolução da variação da extensão média no CFRP, com a percentagem de CFRP, indicia que, entre a quantidade mínima e máxima de reforço aplicada, existirá um ponto óptimo em termos de maximização da mobilização da capacidade resistente máxima do CFRP. Com efeito, para as referidas orientações de reforço, das três percentagens analisadas, foi para a intermédia que se verificou o maior valor da extensão média no CFRP.

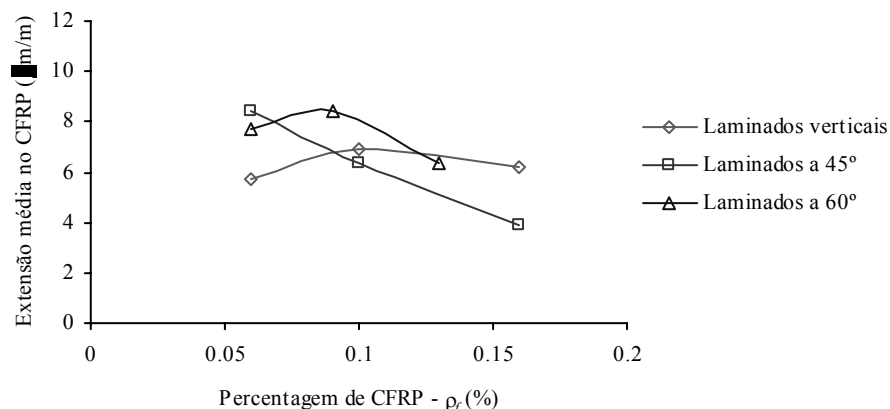


Figura 101 – Extensão no CFRP vs percentagem de reforço de CFRP.

3.6 - Efeito da inclinação do CFRP

Alguns dos aspectos relacionados com o efeito da inclinação do CFRP (α) na eficácia do reforço ao corte de vigas de betão armado, por intermédio da técnica NSM, já foram anteriormente referidos na secção 3.5. Esta secção servirá para complementar os referidos aspectos com ilustrações que incidam especificamente sobre o objectivo de avaliar o referido efeito da inclinação do CFRP. Refira-se que o parâmetro α é a inclinação que o reforço de CFRP faz com o eixo da viga e que foram analisadas três orientações para os laminados: verticais ($\alpha = 90^\circ$), a 45° ($\alpha = 45^\circ$) e a 60° ($\alpha = 60^\circ$).

Na Figura 102 apresentam-se as respostas, carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, da viga de referência 2S-R e das vigas reforçadas ao corte, com a menor quantidade de CFRP aplicada, para as três orientações testadas (2S-3LV com $\alpha = 90^\circ$, 2S-3LI45 com $\alpha = 45^\circ$ e 2S-3LI60 com $\alpha = 60^\circ$). Estas respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente. Para as vigas anteriormente referidas, na Figura 102 também está representada a relação Δ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga. Em termos de rigidez é possível verificar que a solução de laminados a 45° foi a mais eficaz até uma deformação de 3 mm. A partir daí, a solução de laminados a 60° garantiu acréscimos de rigidez semelhantes à solução de laminados a 45° . Relativamente à carga máxima na rotura, a orientação do reforço a 60° , tal como já anteriormente referido, foi bastante mais eficaz que as restantes orientações. A solução de laminados verticais foi a que teve menor desempenho em termos de acréscimo de rigidez, capacidade de carga máxima na rotura e respectiva flecha na secção de aplicação da carga.

Na Figura 103 apresenta-se o padrão de fendilhação final das vigas 2S-3LV, 2S-3LI45 e 2S-3LI60, onde se verifica que a orientação do CFRP modificou o padrão de fendilhação na zona de reforço onde ocorreu a rotura das vigas. Das vigas em análise, a referente à solução com laminados a 60° foi a que teve um padrão de fendilhação menos extenso em termos de fendas diagonais de corte.

A comparação da zona de rotura da viga de referência (2S-R) e das vigas reforçadas ao corte, com a menor quantidade de CFRP aplicada, para as três orientações testadas, está ilustrada nas fotografias da Figura 104. Tal como já se tinha verificado, anteriormente, a orientação do CFRP altera a inclinação da fenda de rotura de corte. A inclinação desta relativamente ao eixo da peça foi de 45° para as vigas 2S-3LV e 2S-3LI45, e 33° para a viga 2S-3LI60, verificando-se que, com a excepção da solução com laminados verticais, as fendas diagonais de corte que estiveram na origem da rotura das vigas propagaram-se segundo uma direcção ortogonal aos laminados. Os valores das inclinações das fendas de corte nos modelos com a menor percentagem de CFRP são semelhantes ou superiores ao valor da referida inclinação na viga de referência 2S-R (34°).

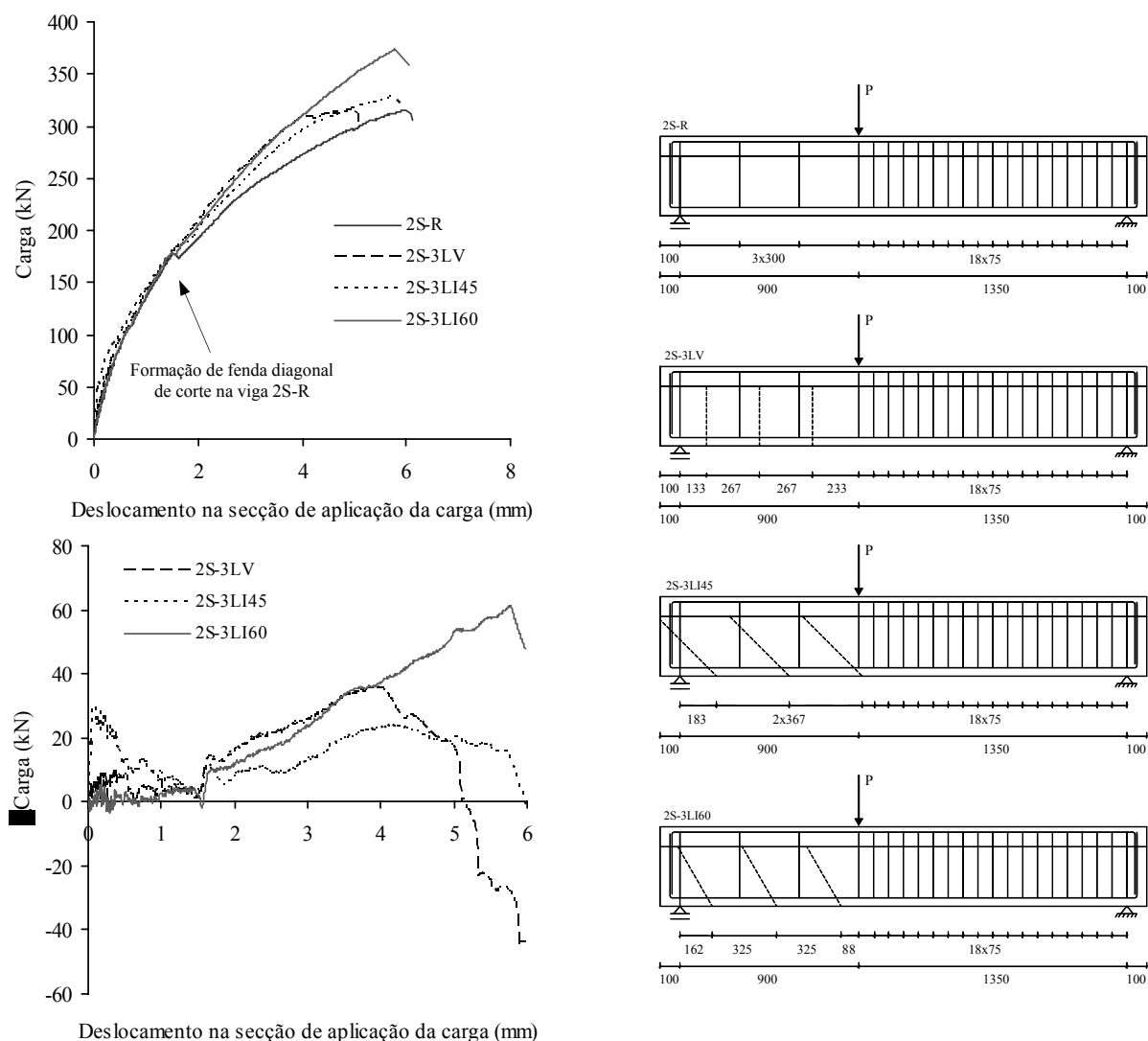


Figura 102 – Efeito da orientação do reforço para a menor percentagem de CFRP (rigidez e capacidade máxima de carga).



Figura 103 – Efeito da orientação do reforço para a menor percentagem de CFRP (padrão de fendilhação final).

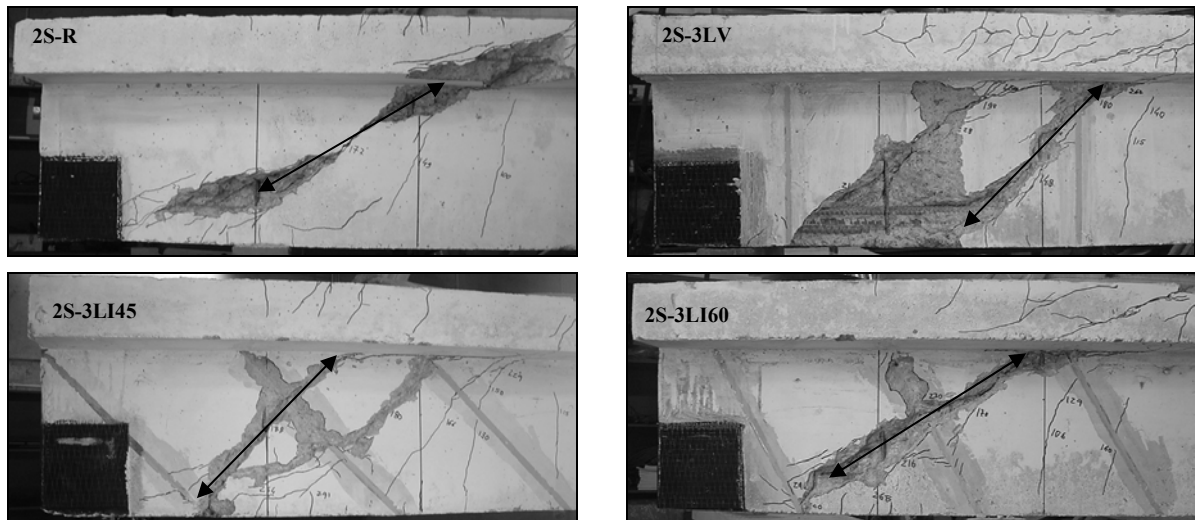


Figura 104 – Efeito da orientação do reforço para a menor percentagem de CFRP (inclinação da fenda de rotura de corte).

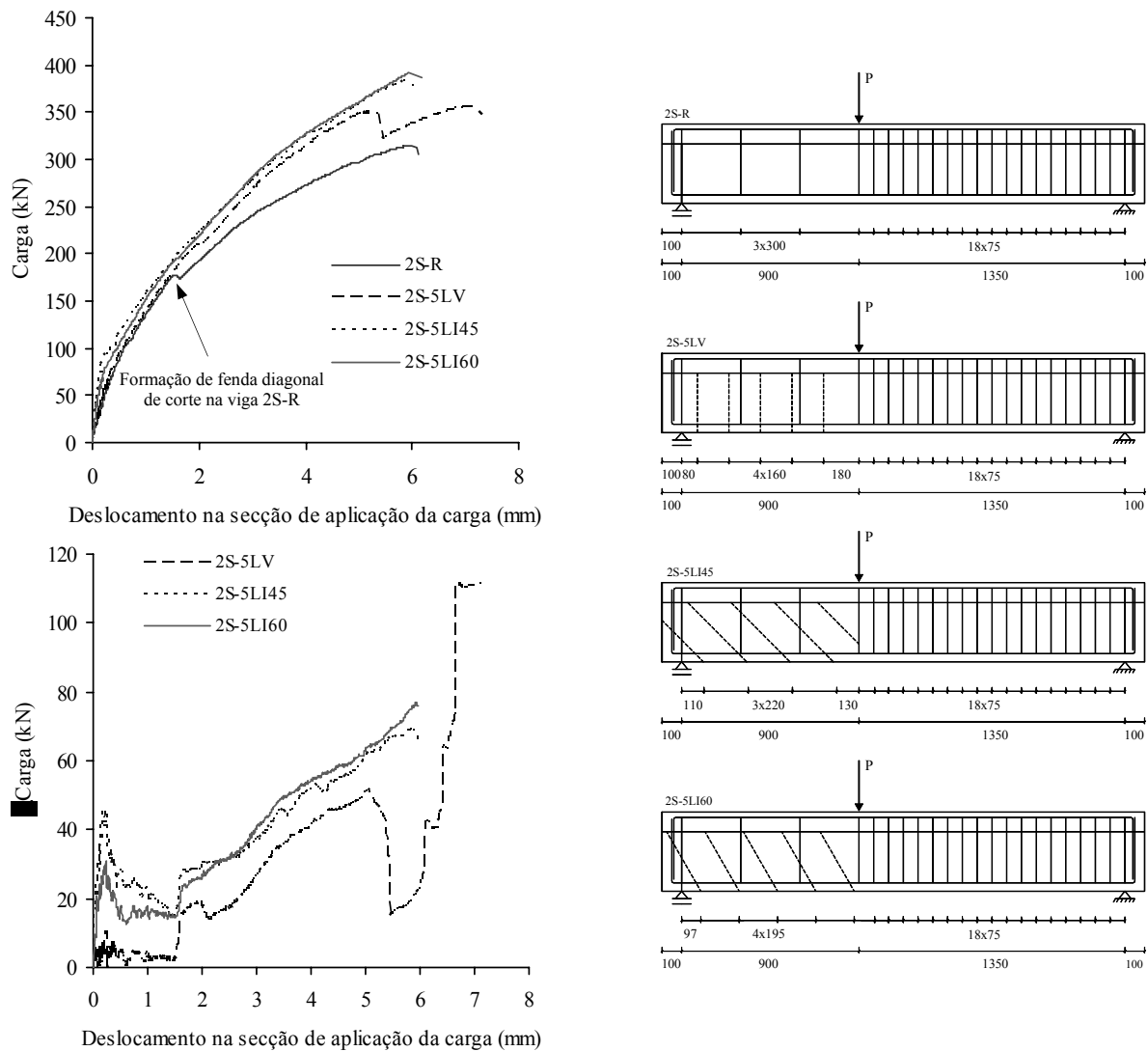


Figura 105 – Efeito da orientação do reforço para a percentagem média de CFRP (rigidez e capacidade máxima de carga).

Na Figura 105 apresentam-se as respostas, carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, da viga de referência 2S-R e das vigas reforçadas ao corte, com a quantidade intermédia de

CFRP aplicada, para as três orientações testadas (2S-5LV com $\alpha = 90^\circ$, 2S-5LI45 com $\alpha = 45^\circ$ e 2S-5LI60 com $\alpha = 60^\circ$). Estas respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente. Para as vigas anteriormente referidas, na Figura 105 também está representada a relação Δ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga. Um dos aspectos que se pode retirar da análise da Figura 105 é o comportamento praticamente semelhante das vigas com o reforço orientado a 45° ($\rho_f = 0.1\%$) e a 60° ($\rho_f = 0.09\%$), embora tenha sido para esta última solução que ocorreu a maior capacidade de carga na rotura. O desempenho da solução de reforço de CFRP disposto na vertical ($\rho_f = 0.1\%$) permitiu, em comparação com as soluções de reforço a 45° e a 60° , menores incrementos de rigidez e uma menor carga máxima na rotura.

Na Figura 106 apresenta-se o padrão de fendilhação final das vigas 2S-5LV, 2S-5LI45 e 2S-5LI60, onde se verifica que a orientação do CFRP modificou o padrão de fendilhação na zona de reforço onde ocorreu a rotura das vigas. Das vigas em análise, a referente à solução com laminados verticais foi a que teve um padrão de fendilhação menos extenso em termos de fendas de corte.



Figura 106 – Efeito da orientação do reforço para a percentagem média de CFRP (padrão de fendilhação final).

A comparação da zona de rotura da viga de referência (2S-R) e das vigas reforçadas ao corte, com a quantidade média de CFRP aplicada, para as três orientações testadas está ilustrada nas fotografias da Figura 107. Tal como já se tinha verificado, anteriormente, a orientação do CFRP altera a inclinação da fenda de rotura de corte. A inclinação desta relativamente ao eixo da peça foi de 40° para a viga 2S-5LV e 36° para as vigas 2S-5LI45 e 2S-5LI60, verificando-se que, com a excepção da solução com laminados verticais, as fendas diagonais de corte, que estiveram na origem da rotura das vigas, propagaram-se segundo uma direcção aproximadamente ortogonal aos laminados. Os

valores das inclinações das fendas de rotura de corte dos modelos reforçados com a percentagem intermédia de CFRP foram superiores ao valor da referida inclinação verificada na viga 2S-R (34°).

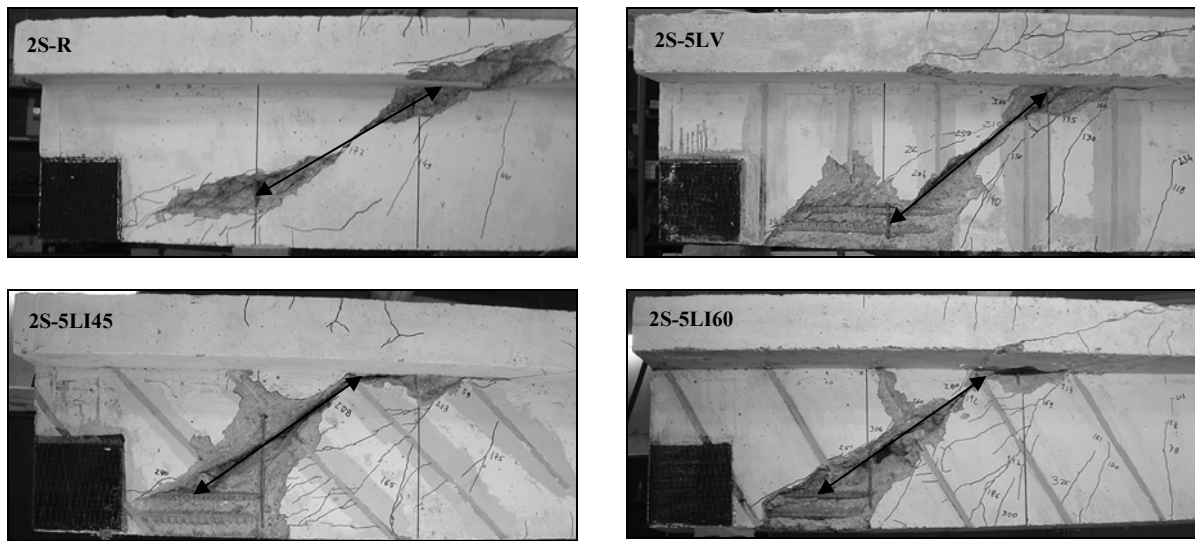


Figura 107 – Efeito da orientação do reforço para a percentagem média de CFRP (inclinação da fenda de rotura de corte).

Na Figura 108 apresentam-se as respostas, carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga, da viga de referência 2S-R e das vigas reforçadas ao corte, com a maior quantidade de CFRP aplicada, para as três orientações testadas (2S-8LV com $\alpha = 90^\circ$, 2S-8LI45 com $\alpha = 45^\circ$ e 2S-7LI60 com $\alpha = 60^\circ$). Além disso, apresenta-se a referida curva de comportamento relativamente à viga 6S-R, que foi o modelo em betão armado concebido de forma a ter uma capacidade máxima resistente equivalente à dos modelos reforçados ao corte aplicando a maior percentagem de reforço de CFRP (2S-8LV, 2S-8LI45 e 2S-7LI60). Estas respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente. Para as vigas anteriormente referidas, na Figura 108 também está representada a relação Δ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

Da análise da Figura 108 é possível verificar o comportamento praticamente semelhante em termos de ganhos de rigidez das vigas com CFRP. Relativamente a estas, o modelo de betão armado equivalente (viga 6S-R) apresentou uma menor rigidez. Este facto não se verificou em termos de capacidade máxima resistente, pois a viga 6S-R, a par da viga 2S-7LI60 (reforço com laminados inclinados a 60°), obteve a maior capacidade de carga. A solução de laminados verticais permitiu um melhor desempenho na rotura que a solução de laminados inclinados a 45° . A viga 6S-R teve melhor desempenho que as vigas com CFRP em termos de flecha de rotura na secção de aplicação da carga.

Na Figura 109 apresenta-se o padrão de fendilhação registado no final do ensaio das vigas 2S-8LV, 2S-8LI45 e 2S-7LI60, onde se verifica que a orientação do CFRP modificou o padrão de fendilhação na zona de reforço onde ocorreu a rotura das vigas.

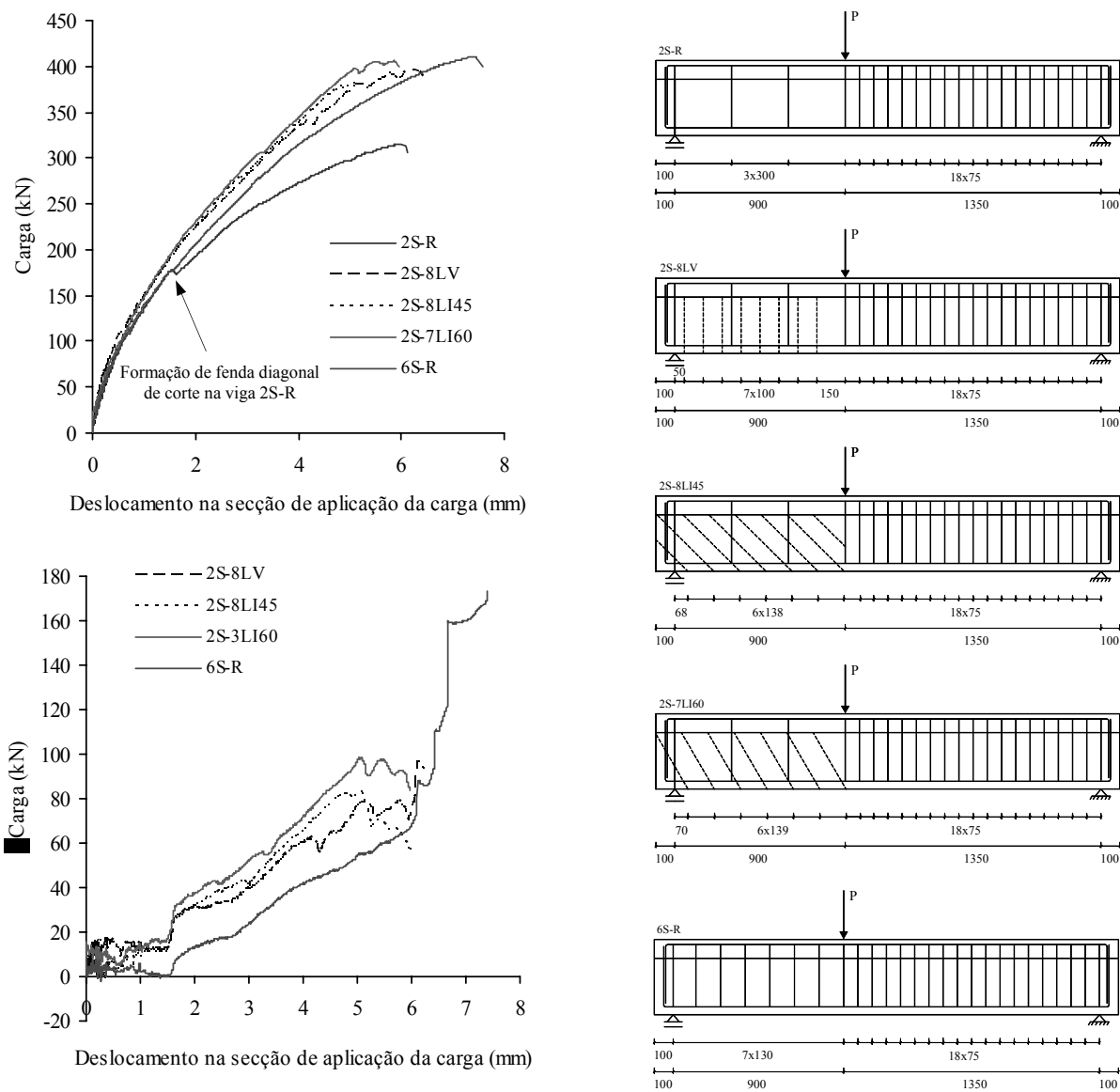


Figura 108 – Efeito da orientação do reforço para a maior percentagem de CFRP (rigidez e capacidade máxima de carga).

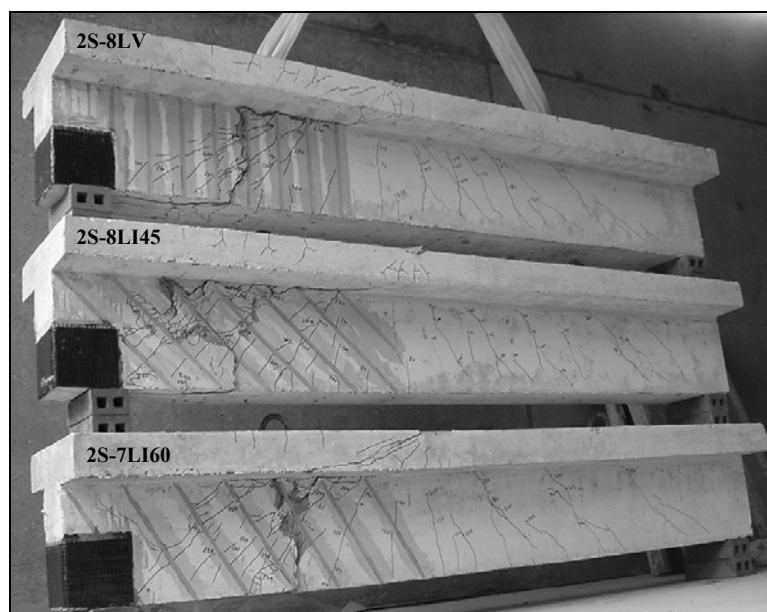


Figura 109 – Efeito da orientação do reforço para a maior percentagem de CFRP (padrão de fendilhação final).

A comparação da zona de rotura das vigas de referência (viga 2S-R e viga 6S-R) com a das vigas reforçadas ao corte, com a maior quantidade de CFRP aplicada, para as três orientações testadas está ilustrada nas fotografias da Figura 110. Tal como já se tinha verificado, anteriormente, a orientação do CFRP altera a inclinação da fenda de rotura de corte. A inclinação desta relativamente ao eixo da peça foi de 36° para as vigas 2S-8LV e 2S-8LI45 e 37° para a viga 2S-7LI60. Ou seja, com a excepção da solução com laminados verticais, as fendas diagonais de corte, que estiveram na origem da rotura das vigas, propagaram-se segundo uma direcção, aproximadamente, ortogonal à dos laminados. Os valores das inclinações das fendas de rotura de corte nos modelos reforçados com a maior percentagem de CFRP aplicada, anteriormente referidos, são superiores ao valor da referida inclinação na viga 2S-R (34°) e na viga 6S-R (35°).

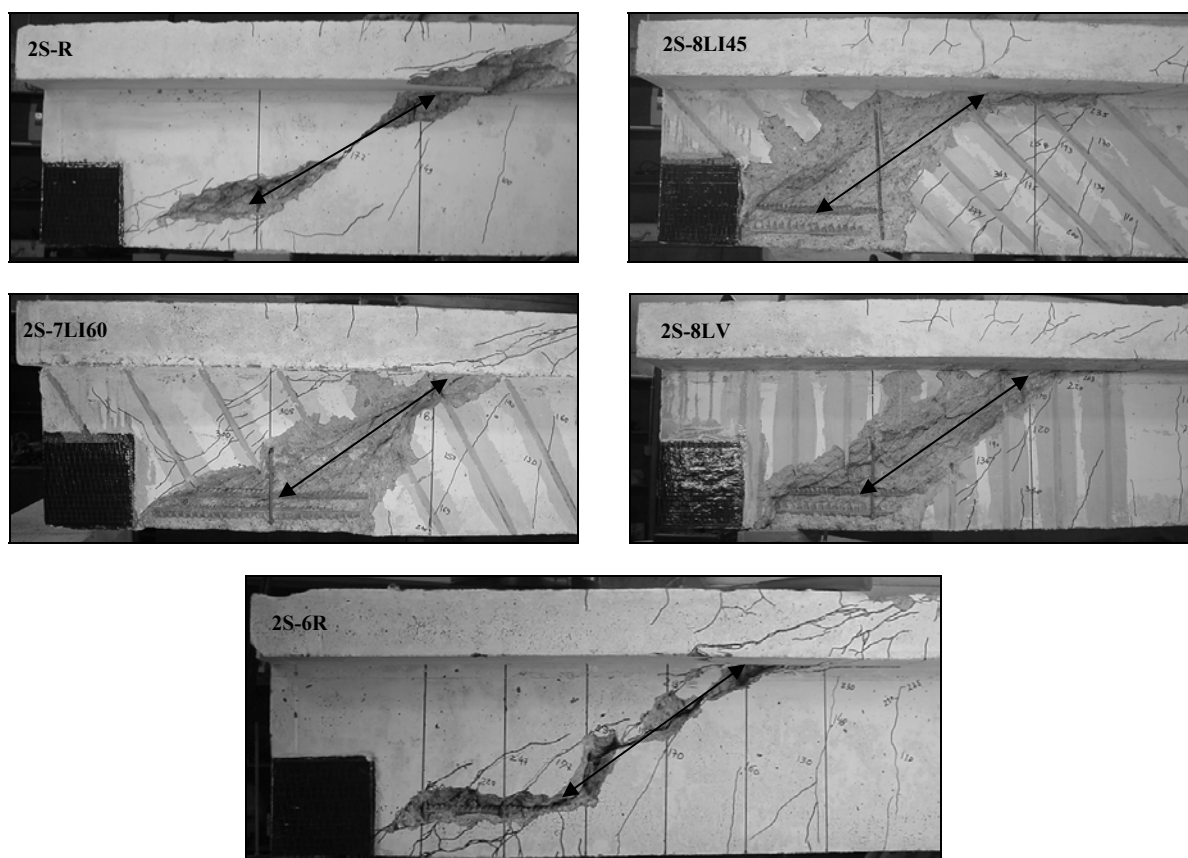


Figura 110 – Efeito da orientação do reforço para a maior percentagem de CFRP (inclinação da fenda de rotura de corte).

Na Figura 100 apresentou-se a relação ganho de resistência vs percentagem de reforço de CFRP relativamente às nove vigas ensaiadas (três percentagens de CFRP para cada uma das três orientações de reforço analisadas). A análise da Figura 100 permitiu retirar as conclusões principais relativamente ao efeito da orientação do CFRP na eficácia do reforço ao corte de vigas de betão armado, por intermédio da técnica da inserção de laminados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Na Figura 111 apresenta-se o ganho de resistência proporcionado pelas nove

soluções de reforço testadas, divididas em três grupos (função da percentagem do CFRP), de forma a melhor ilustrar as conclusões anteriormente referidas, nomeadamente:

- o melhor rendimento da solução com laminados a 60° independentemente da percentagem de CFRP aplicada;
- o melhor rendimento da solução com laminados a 45° relativamente à solução de laminados verticais, com a excepção do caso da maior percentagem de CFRP;
- a solução de laminados verticais utilizando a menor percentagem de CFRP não trouxe qualquer benefício em termos de ganho de resistência. Também, para a referida percentagem de CFRP, mas aplicado a 45°, o ganho de resistência foi baixo (4.1%).

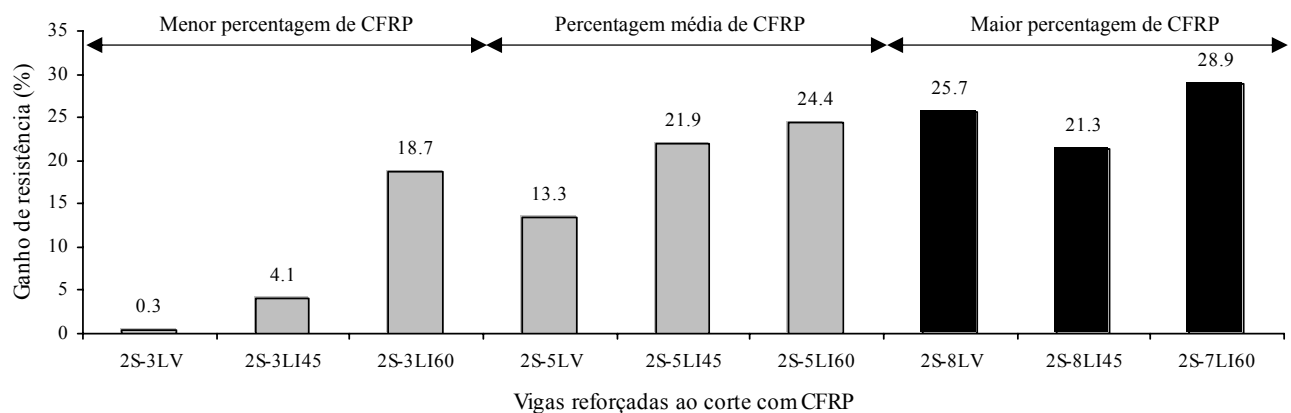


Figura 111 – Efeito da orientação do reforço na eficácia do reforço.

3.7 - Contribuição dos vários materiais na resistência ao esforço transversal

O valor do esforço transversal resistente de cada uma das vigas ensaiadas é de (Figura 22):

$$V_r = 0.6F_{max} \quad (8)$$

em que F_{max} é o valor da força máxima registada em cada viga (Tabela 8).

Adoptando, para o caso das vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, o mesmo princípio que é utilizado nos códigos de dimensionamento para quantificação da parcela resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado, tem-se:

$$V_r = V_c + V_s + V_f \quad (9)$$

ou seja, às contribuições do betão (V_c) e dos estribos de aço (V_s) é adicionada a contribuição do reforço ao corte com CFRP (V_f).

Na Tabela 21 apresentam-se, para as vigas ensaiadas, o valor de V_r e das respectivas componentes presentes na expressão (9). Relativamente a estas, a Figura 112 ilustra o “peso” da contribuição de cada um dos materiais no valor de V_r . Refira-se que a contribuição do betão (V_c) foi

obtida por intermédio do resultado da viga de referência C-R, enquanto a contribuição dos estribos de aço (V_s), nas vigas com CFRP, foi obtida por intermédio do resultado da viga de referência 2S-R.

Tabela 21 – Valor do esforço transversal resistente de cada viga ensaiada e as contribuições do betão, do aço e do CFRP.

Vigas	Reforço ao corte em cada uma das faces do menor dos vãos de corte	V_r (kN)	V_c^* (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)
C-R	-	145.8	145.8	-	-
2S-R	Dois estribos de aço	189	145.8	43.2	-
6S-R	Seis estribos de aço	246	145.8	100.2	-
2S-3LV	Dois estribos de aço + três laminados verticais	189.6	145.8	43.2	0.6
2S-5LV	Dois estribos de aço + cinco laminados verticais	214.2	145.8	43.2	25.2
2S-8LV	Dois estribos de aço + oito laminados verticais	237.6	145.8	43.2	48.6
2S-3LI45	Dois estribos de aço + três laminados inclinados a 45°	196.8	145.8	43.2	7.8
2S-5LI45	Dois estribos de aço + cinco laminados inclinados a 45°	230.4	145.8	43.2	41.4
2S-8LI45	Dois estribos de aço + oito laminados inclinados a 45°	229.2	145.8	43.2	40.2
2S-3LI60	Dois estribos de aço + três laminados inclinados a 60°	224.4	145.8	43.2	35.4
2S-5LI60	Dois estribos de aço + cinco laminados inclinados a 60°	235.2	145.8	43.2	46.2
2S-7LI60	Dois estribos de aço + sete laminados inclinados a 60°	243.6	145.8	43.2	54.6

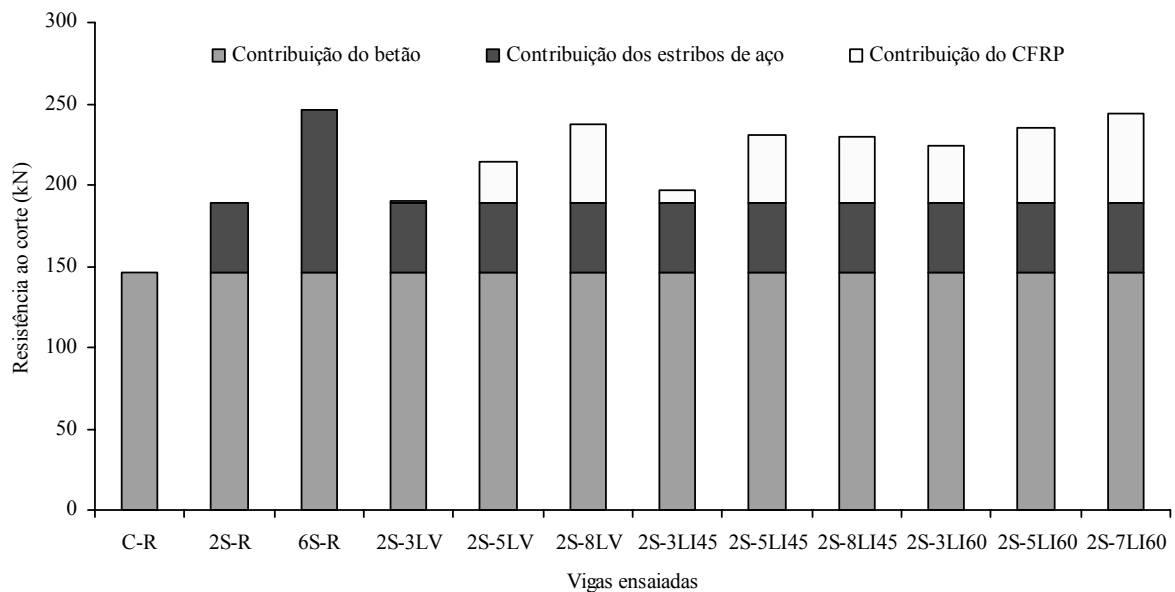


Figura 112 – Contributo dos vários materiais para a resistência ao esforço transversal.

Da análise dos dados da Tabela 21 e da Figura 112 é possível verificar os seguintes pontos:

- o contributo do betão destacou-se do contributo dos restantes materiais;
- o contributo, em termos de resistência ao esforço transversal, proporcionado pela colocação de dois estribos de aço no menor vão de corte e sem CFRP (viga 2S-R) foi de 43.2 kN. A passagem de dois estribos (viga 2S-R) para seis estribos de aço (viga 6S-R) permitiu que referido contributo fosse de 100.2 kN. Este aumento não foi proporcional ao aumento da percentagem de estribos.

iii) a solução de reforço de CFRP que garantiu, relativamente à viga 2S-R, um acréscimo de resistência ao esforço transversal semelhante ao da solução da viga 6S-R (57 kN) foi a da viga 2S-7LI60 (54.6 kN). A capacidade resistente ao corte conferida pelo reforço da viga 2S-8LV (48.6 kN) foi 85% do garantido pela viga 6S-R. As soluções de reforço de CFRP das vigas referidas, conjuntamente, com as das vigas 2S-5LI45, 2S-8LI45 e 2S-7LI60, garantiram contributos superiores a 70% do garantido pelo reforço em estribos de aço colocado na viga 6S-R.

4. RENDIMENTO DA TÉCNICA NSM COM LAMINADOS DE CFRP NO REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

Nesta secção pretende-se efectuar uma análise do rendimento da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado. Para tal, os valores obtidos na campanha de ensaios apresentada neste trabalho serão comparados com valores experimentais obtidos noutras campanhas de ensaios. Na Tabela 22 apresentam-se os principais dados dos modelos de viga que vão ser considerados na análise referida anteriormente.

Tabela 22 – Dados das vigas de betão armado com CFRP utilizadas para avaliar o rendimento da técnica NSM.

Modelo	b_w (m)	d (m)	Secção	f_c (MPa)	Configuração	ρ_f (%)	E_f (GPa)	ε_{fu} (%)	α (°)	ρ_{sw} (%)	ρ_{sl} (%)	E_s (GPa)	a/d	CFRP na rotura	V_f (kN)	V_{total} (kN)
KH2(BT4)	0.15	0.355	T-	35	EBR - St-U	0.88	228	16.6	90	0	2.31	200	3	Descolamento	72	162
DE1(T6NS-C45)	0.14	0.54	T-	44.1	EBR - St-U	2.22	230	15	45	0	2.81	200	2.9	Descolamento	103.5	213.6
DE1(T6S4-C90)	0.14	0.54	T-	44.1	EBR - St-U	1.57	230	15	90	0.1	2.81	200	2.9	Descolamento	85.25	272.8
DE2(T4S2-C45)	0.14	0.34	T-	29.4	EBR - St-U	2.22	230	15	45	0.2	2.23	200	3.2	Descolamento	17.8	219.05
LN (B90-7)	0.152	0.356	T-	31.4	NSM - rod	5.23	104.6	17.9	90	0	2.38	200	3	Pull out	24.9	115.2
LN (B90-5)	0.152	0.356	T-	31.4	NSM - rod	7.32	104.6	17.9	90	0	2.38	200	3	Pull out	37.4	127.7
LN (B90-5A)	0.152	0.356	T-	31.4	NSM - rod - A	7.32	104.6	17.9	90	0	2.38	200	3	SP	95.6	185.9
LN (B45-7)	0.152	0.356	T-	31.4	NSM - rod	7.39	104.6	17.9	45	0	2.38	200	3	Pull out	75.2	165.5
LN (B45-5)	0.152	0.356	T-	31.4	NSM - rod	10.36	104.6	17.9	45	0	2.38	200	3	SP	87.6	177.9
LN (BS90-7A)	0.152	0.356	T-	31.4	NSM - rod - A	5.23	104.6	17.9	90	0.26	2.38	200	3	SP+flexão	53.4	206.8
DB1 (A10-VL)	0.15	0.3	Rec.	49.2	NSM - lam	0.93	166	13	90	0	0.76	200	2.2	Pull out	29.1	79.3
DB1 (A10-IL)	0.15	0.3	Rec.	49.2	NSM - lam	0.88	166	13	45	0	0.76	200	2.2	Flexão	28.8	79
DB1 (A12-VL)	0.15	0.3	Rec.	49.2	NSM - lam	1.87	166	13	90	0	1.1	200	2.2	Pull out	59.3	117.6
DB1 (A12-IL)	0.15	0.3	Rec.	49.2	NSM - lam	1.76	166	13	45	0	1.1	200	2.2	Flexão	73	131.2
DB1 (B10-VL)	0.15	0.123	Rec.	56.2	NSM - lam	1.87	166	13	90	0	1.69	200	2.4	Spalling	28.6	65.6
DB1 (B10-IL)	0.15	0.123	Rec.	56.2	NSM - lam	1.76	166	13	45	0	1.69	200	2.4	Spalling	23.2	60.2
DB1 (B12-VL)	0.15	0.123	Rec.	56.2	NSM - lam	3.73	166	13	90	0	2.44	200	2.4	Spalling	31.7	69.6
DB1 (B12-IL)	0.15	0.123	Rec.	56.2	NSM - lam	3.52	166	13	45	0	2.44	200	2.4	Spalling	36.4	74.3
DB2 (CRFLV)	0.18	0.36	T-	47.9	NSM - lam	3.11	166	17.7	90	0	2.3	200	2.5	Spalling	98.7	205.3
DB2 (CRFLI1)	0.18	0.36	T-	47.9	NSM - lam	3.14	166	17.7	45	0	2.3	200	2.5	Spalling	148.6	255.2
DB3 (2S-3LV)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	0.6	166	17.7	90	0.11	2.95	200	2.5	Pull out	1	190
DB3 (2S-5LV)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	1	166	17.7	90	0.11	2.95	200	2.5	Pull out	42	214
DB3 (2S-8LV)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	1.6	166	17.7	90	0.11	2.95	200	2.5	Spalling	81	238
DB3 (2S-3LI45)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	0.6	166	17.7	45	0.11	2.95	200	2.5	Pull out	13	197
DB3 (2S-5LI45)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	1	166	17.7	45	0.11	2.95	200	2.5	Pull out	69	230
DB3 (2S-8LI45)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	1.6	166	17.7	45	0.11	2.95	200	2.5	Spalling	67	229
DB3 (2S-3LI60)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	0.6	166	17.7	60	0.11	2.95	200	2.5	Pull out	59	224
DB3 (2S-5LI60)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	0.9	166	17.7	60	0.11	2.95	200	2.5	Pull out	77	235
DB3 (2S-7LI60)	0.18	0.353	T-	31.1	NSM - lam	1.3	166	17.7	60	0.11	2.95	200	2.5	Spalling	91	244

Notas: 1) KH2 = Khalifa (2000); DE1 = Deniaud (2001); DE2 = Deniaud (2003); LN = De Lorenzis (2001); DB1 = Dias (2004); DB2 = Dias (2005); DB3 = Dias (presente estudo). 2) EBR - Colagem externa de CFRP; St - Reforço discreto de mantas de CFRP; U - Reforço de CFRP em forma de U; NSM - Inserção do CFRP no betão de recobrimento; rod - varão de CFRP; lam - laminado de CFRP. Na coluna CFRP na rotura SP refere-se ao destacamento do betão de recobrimento das armaduras longitudinais (ver Figura 16).

Os modelos não pertencentes ao programa experimental apresentado nas secções 2 e 3, e que foram escolhidos para a análise efectuada nesta secção, caracterizam-se por serem:

i) modelos de viga geometricamente semelhantes aos da presente campanha de ensaios: uns reforçados ao corte com faixas discretas de manta de CFRP em forma de U (Khalifa e Nanni, 2000

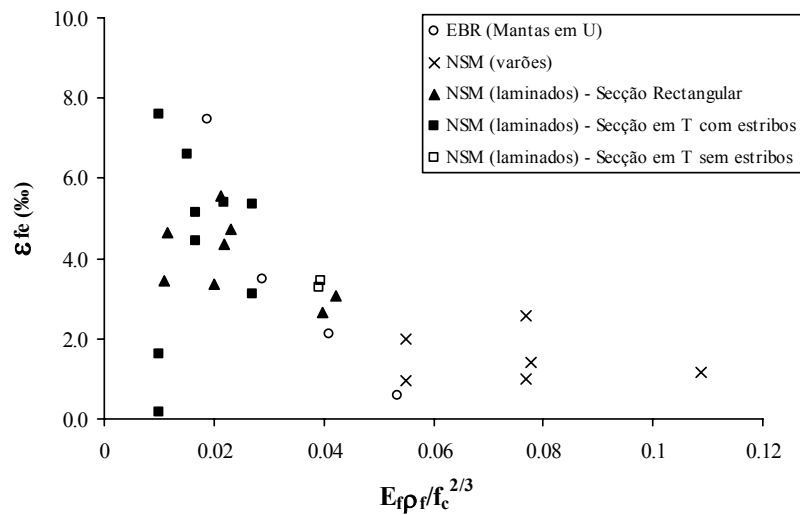
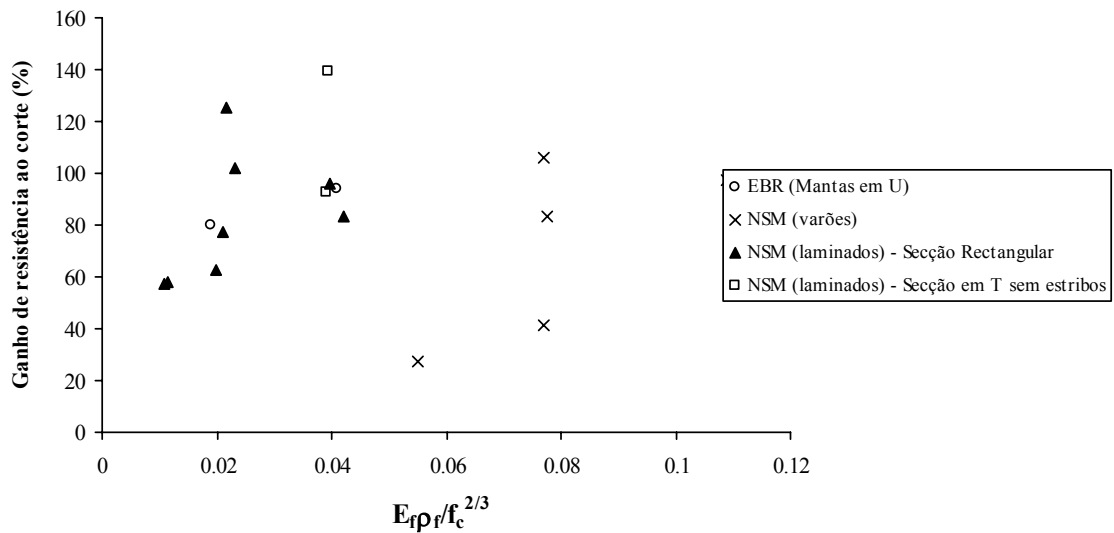
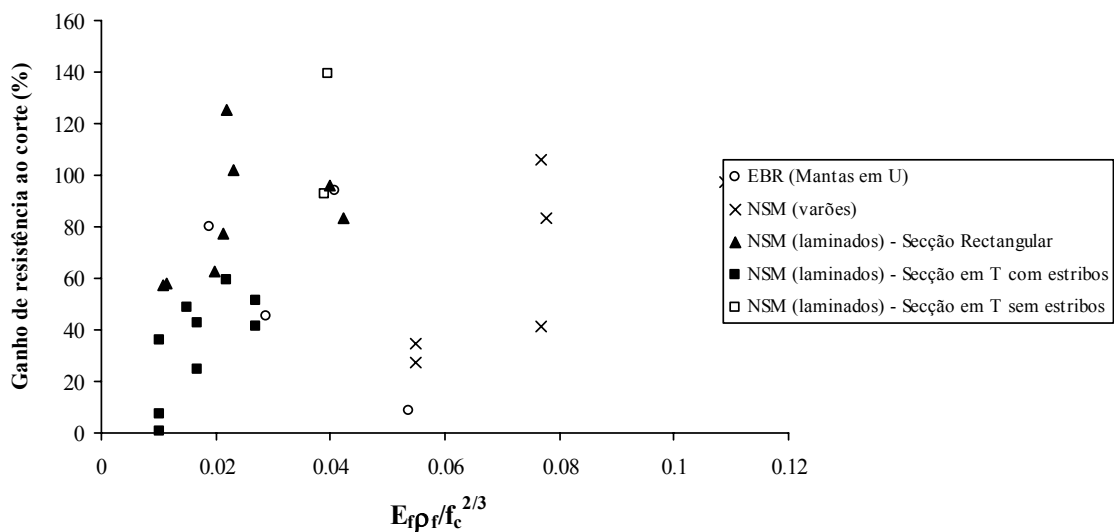
e Deniaud e Cheng, 2001); e outros reforçados ao corte com varões de CFRP inseridos no betão de recobrimento (De Lorenzis e Nanni, 2001);

- ii) modelos geometricamente iguais aos da presente campanha de ensaios, reforçados com laminados de CFRP usando a técnica NSM, mas sem conterem estribos de aço (Dias e Barros, 2005);
- iii) modelos de secção transversal diferente dos da presente campanha de ensaios (secção transversal rectangular) e reforçados com laminados de CFRP usando a técnica NSM (Dias e Barros, 2004-b). Para este tipo de modelos existem apenas vigas sem armadura transversal.

Na Figura 113 apresenta-se, para os modelos da Tabela 22, a relação entre a extensão efectiva ε_{fe} , obtida usando a expressão (2), e o parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$. Este, tal como foi referido na secção 1.3, engloba a rigidez do reforço de CFRP ($E_f \rho_f$) e o tipo de betão das vigas (f_c). Na Figura 113 é possível verificar que a efectividade do reforço (ε_{fe}) depende da grandeza do parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$. Concretamente, independentemente da técnica de reforço e do tipo de CFRP, o valor de ε_{fe} , ou seja o nível de rendimento do CFRP, diminui com o aumento do valor do parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$. Esta conclusão já tinha sido referida na análise efectuada na secção 1.3 unicamente direccionada para modelos reforçados ao corte com CFRP aplicados segundo a técnica da colagem externa. Ao mesmo tempo, é possível verificar que, de um modo geral, os valores mais elevados de ε_{fe} estão associados à técnica NSM com laminados de CFRP e os valores mais baixos de ε_{fe} estão associados à técnica NSM com varões de CFRP. Esta última solução de reforço, no que diz respeito ao parâmetro ε_{fe} , é a menos sensível com a variação de $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$.

Outro aspecto que se pode evidenciar na análise da Figura 113 é o facto, das soluções de reforço com laminados de CFRP aplicadas a vigas de secção em T e sem estribos de aço, às quais correspondem a valores de $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ relativamente altos (cerca de 0.05), apresentarem níveis baixos de extensão efectiva, comparativamente a outros modelos reforçados ao corte com a mesma técnica e com o mesmo tipo de reforço. Tal, deve-se ao modo de rotura experimentado por aqueles modelos, que foi o “spalling” das paredes “betão de recobrimento+CFRP” (Dias e Barros, 2005).

Os valores mais baixos de ε_{fe} para modelos reforçados com laminados de CFRP segundo a NSM referem-se aos modelos do presente estudo (secções 2 e 3) que foram reforçados em cada face do menor vão de corte com três laminados de CFRP, na vertical e inclinados a 45°. Este facto reforça a necessidade de se impor um espaçamento máximo aos laminados de CFRP para que haja o mínimo de rendimento do reforço.


 Figura 113 – Relação ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$.

 Figura 114 – Ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ para os modelos sem armadura transversal.

 Figura 115 – Ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ para todos os modelos em análise.

Nas Figuras 114 e 115 apresenta-se o ganho de resistência ao corte vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$, respectivamente, para os modelos da Tabela 22 sem armadura transversal e para a globalidade dos modelos da referida tabela. O ganho de resistência ao corte foi quantificado usando a expressão (1). Tal como se verificou com a relação, ε_{fe} vs $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ (Figura 113), também para as relações representadas nas Figuras 114 e 115 os modelos com laminados de CFRP inseridos tiveram o melhor desempenho. Por outras palavras, valores mais baixos de $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$ associados a este tipo de reforço proporcionaram ganhos de resistência iguais ou superiores aos dos modelos reforçados com varões de CFRP (Figuras 114 e 115). De um modo geral, para valores semelhantes do parâmetro $E_f \rho_f / f_c^{2/3}$, a técnica NSM com laminados apresenta-se mais eficaz que a técnica EBR.

Outro aspecto que se pode constatar, comparando as Figuras 114 e 115, é que aos modelos com armadura transversal estão associados os mais baixos ganhos de resistência ao esforço transversal. Este facto vem ao encontro do que foi referido na secção 1.3, relativamente, ao efeito da armadura transversal na eficácia do reforço ao corte com CFRP.

5. CONTRIBUIÇÃO DO CFRP NA RESISTÊNCIA AO ESFORÇO TRANSVERSO: VALORES EXPERIMENTAIS VS VALORES ANALÍTICOS

Nesta secção será efectuada uma análise comparativa entre os valores, obtidos experimentalmente, da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal das vigas apresentadas nas secções 2 e 3, com os resultantes da aplicação da formulação analítica proposta por Nanni *et al.* (2004).

5.1 - Expressões analíticas propostas por Nanni *et al.* (2004)

Segundo Nanni *et al.* (2004), a contribuição do CFRP para a resistência ao esforço transversal de uma determinada secção de betão armado reforçada ao corte por intermédio da inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento (V_f) é dada pela seguinte expressão:

$$V_f = 4 \cdot (a_l + b_l) \cdot \tau_b \cdot L_{tot\ min} \quad (10)$$

em que a_l e b_l são as dimensões da secção transversal do laminado de CFRP, τ_b é o valor médio da tensão de aderência e $L_{tot\ min}$ é o somatório dos comprimentos de colagem efectivos dos laminados de CFRP, L_i , que atravessam a fenda de corte na posição mais desfavorável, ou seja:

$$L_{tot\ min} = \sum_i L_i \quad (11)$$

O comprimento de colagem efectivo dos laminados de CFRP que atravessam a fenda de corte (inclinação admitida constante e igual a 45°), na posição mais desfavorável, é obtido por intermédio da expressão:

$$L_i = \begin{cases} \min\left(\frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max}\right) & i = 1, \dots, \frac{N}{2} \\ \min\left(l_{net} - \frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max}\right) & i = \frac{N}{2} + 1, \dots, N \end{cases} \quad (12)$$

em que α é a inclinação do reforço relativamente ao eixo da viga, s_f é o espaçamento dos laminados de CFRP e l_{net} é o comprimento efectivo do CFRP, sendo obtido por:

$$l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha} \quad (13)$$

em que, conforme representado na Figura 116, l_b é o comprimento do laminado e c é a distância da face horizontal da alma da viga ao centro geométrico das armaduras longitudinais.

A primeira limitação na expressão (12), associada à resistência da ligação colada, representa o mínimo comprimento efectivo do CFRP interceptado pela fenda de corte e é função do termo N :

$$N = \frac{l_{eff}(1 + \cot \alpha)}{s_f} \quad (14)$$

em que N é o menor inteiro resultante da expressão (14) (exemplo, $N = 5.7 \Rightarrow N = 5$) e l_{eff} é a projecção vertical de l_{net} . Conforme representado na Figura 116, pode escrever-se:

$$l_{eff} = l_b \sin \alpha - 2c \quad (15)$$

A segunda limitação na expressão (12), $L_i = l_{max}$, resulta da imposição para extensão no CFRP de um valor máximo designado por ε_{fe}^{max} . O valor do comprimento efectivo do laminado de CFRP atravessado pela fenda de corte quando sujeito a uma extensão de valor igual a ε_{fe}^{max} , designado por l_{max} , é obtido pela condição de equilíbrio das forças representadas na Figura 117 e vale:

$$l_{max} = \varepsilon_{fe}^{max} \cdot \frac{a_l \cdot b_l}{a_l + b_l} \cdot \frac{E_f}{\tau_b} \quad (16)$$

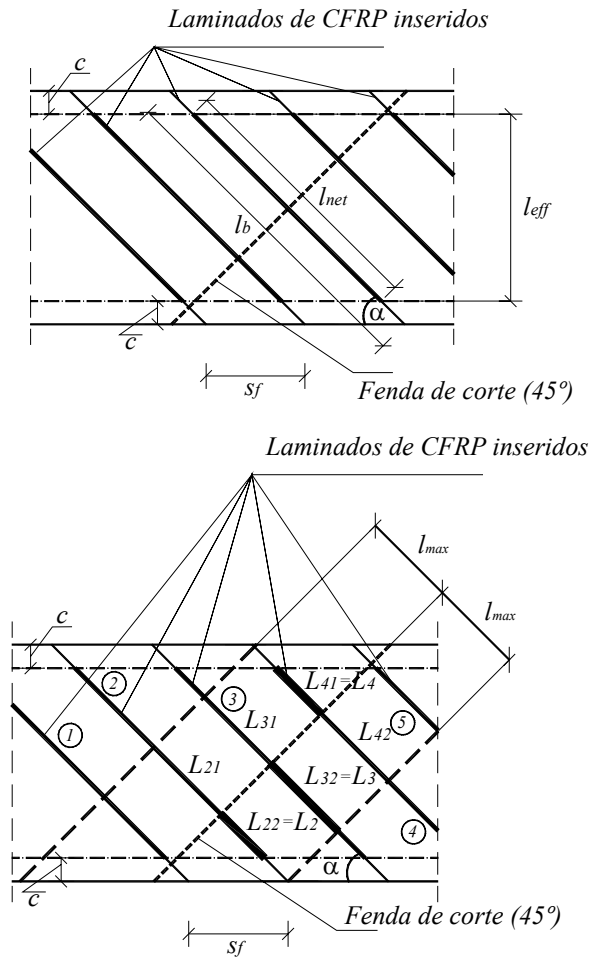


Figura 116 – Representação gráfica das variáveis da formulação de Nanni *et al.* (2004)
(para este exemplo tem-se que $\sum_i L_i = L_2 + L_3 + L_4$).

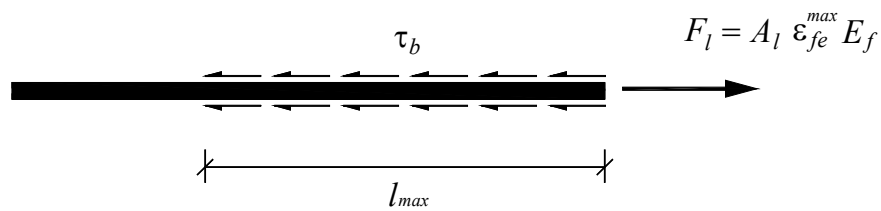


Figura 117 – Representação gráfica de l_{max} .

5.2 - Calibração dos parâmetros τ_b e ϵ_{fe}^{max} para a técnica NSM com laminados de CFRP

Nanni *et al.* (2004) propuseram que o valor da tensão de aderência, τ_b , fosse de 6.9 MPa e que a extensão máxima admissível no CFRP, ϵ_{fe}^{max} , fosse de 4‰. O valor da tensão de aderência proposto ($\tau_b=6.9$ MPa) resultou de uma campanha de ensaios de “pull-out” à flexão utilizando varões de CFRP (De Lorenzis e Nanni, 2001). O valor da extensão máxima no CFRP proposto ($\epsilon_{fe}^{max}=4‰$) resultou de uma indicação de Khalifa (1998) para as situações em que os CFRP são utilizados no

reforço ao corte, quando aplicados pela técnica da colagem externa (EBR), e tem como objectivo garantir o “aggregate interlock of the concrete”. Refira-se que esta condição é, actualmente, uma imposição do ACI (ACI Committee 440, 2002) na sua proposta de dimensionamento de reforços ao corte de CFRP aplicados usando a técnica EBR.

Dias e Barros (2004-b) propuseram novos valores para os parâmetros τ_b e ε_{fe}^{max} . Para tal, tomaram como base os resultados experimentais obtidos em ensaios de “pull-out” em flexão usando laminados de CFRP (Sena-Cruz e Barros, 2004), e propuseram para τ_b o valor de 16.1 MPa e para ε_{fe}^{max} o valor de 5.9‰. Estes novos valores de τ_b e ε_{fe}^{max} e os propostos por Nanni *et al.* ($\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe}^{max} = 4$ ‰) foram utilizados, por Barros e Dias (2005), numa análise comparativa que efectuaram entre, os valores experimentais do contributo do CFRP na resistência ao corte obtidos nos modelos ensaiados por Dias e Barros (2004-b), e os valores analíticos obtidos usando as expressões propostas por Nanni *et al.* (2004). A referida análise comparativa conduziu a uma maior proximidade entre os valores experimentais e os valores analíticos ($V_f^{exp.} / V_{fd}^{ana.} = 1.39$) usando os parâmetros τ_b e ε_{fe}^{max} propostos por Dias e Barros ($\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe}^{max} = 5.9$ ‰). Refira-se que, usando os valores de τ_b e ε_{fe}^{max} propostos Nanni *et al.*, a relação $V_f^{exp.} / V_{fd}^{ana.}$ foi de 2.51.

5.3 - Valores analíticos para a contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal

Os resultados experimentais da contribuição de cada uma das soluções de reforço ao corte com laminados de CFRP ($V_f^{exp.}$) referentes às vigas ensaiadas no âmbito deste trabalho (secções 2 e 3) estão representados na Tabela 23. Os respectivos valores analíticos, que foram obtidos usando a formulação de Nanni *et al.* (2004) e considerando para tensão de aderência, τ_b , e para extensão máxima admissível no CFRP, ε_{fe}^{max} , os valores propostos por Dias e Barros ($\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe}^{max} = 5.9$ ‰), encontram-se registados, também, na Tabela 23 ($V_f^{ana.1}$). Na secção 2.4 deste relatório (*Comportamento dos sistemas de reforço ao corte utilizados*) concluiu-se que o valor médio da extensão obtida no laminado instrumentado, para as várias soluções de reforço de CFRP testadas, foi de 6.6‰. Considerando este valor para ε_{fe}^{max} (em vez de $\varepsilon_{fe}^{max} = 5.9$ ‰) e mantendo $\tau_b = 16.1$ MPa, calcularam-se as contribuições analíticas do CFRP ($V_f^{ana.2}$) na resistência ao esforço transversal referentes às várias vigas anteriormente referidas (ver Tabela 23).

Refira-se que as expressões propostas por Nanni *et al.* (2004) não permitiram quantificar analiticamente o valor da contribuição, na resistência ao esforço transversal, das soluções de reforço de CFRP das vigas 2S-3LV e 2S-3LI60, pois verificou-se que nestes modelos o afastamento dos laminados, s_f , era superior ao valor da altura l_{eff} . Se para o caso da viga 2S-3LV se veio a constatar experimentalmente que o contributo do CFRP na resistência ao esforço transversal era quase nulo, na solução referente à viga 2S-3LI60 tal não aconteceu. Com efeito, verificou-se que nesta viga o valor de $V_f^{exp.}$ foi de 35.4 kN. Desta forma pode-se adiantar que as expressões analíticas propostas por Nanni *et al.* (2004) não contemplam cenários de reforço como o que foi aplicado na viga 2S-3LI60.

Tabela 23 – Comparação de resultados experimentais vs analíticos.

Vigas	Experimentais	Analíticos		$V_{fd}^{exp.} / V_f^{ana.1}$	$V_{fd}^{exp.} / V_f^{ana.2}$
	$V_f^{exp.}$ (kN)	$V_f^{ana.1}$ (kN)	$V_f^{ana.2}$ (kN)		
2S-3LV	0.6	*	*	-	-
2S-5LV	25.2	19.8	22.0	1.27	1.15
2S-8LV	48.6	23.0	25.3	2.11	1.92
2S-3LI45	7.8	16.9	16.9	0.46	0.45
2S-5LI45	41.4	19.8	22.2	2.09	1.86
2S-8LI45	40.2	39.7	44.4	1.04	0.91
2S-3LI60	35.4	*	*	-	-
2S-5LI60	46.2	19.8	22.2	2.33	2.08
2S-7LI60	54.6	38.1	40.4	1.43	1.35

* Modelos em que não foi possível quantificar analiticamente a contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal.

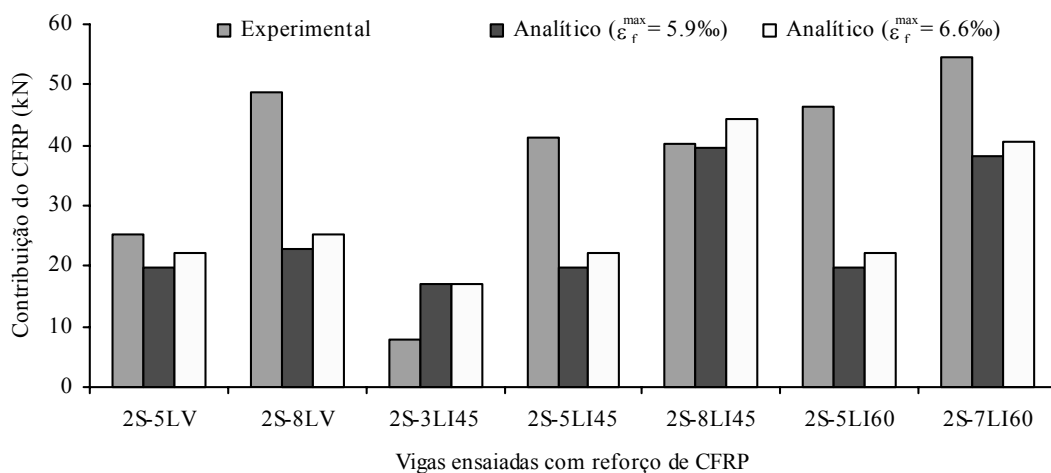


Figura 118 – Valores experimentais vs analíticos da contribuição do CFRP.

Na Figura 118 ilustram-se as diferenças dos valores experimentais e analíticos (duas hipóteses analisadas) do contributo dos CFRP para a resistência ao corte das vigas de betão armado reforçadas, por intermédio da técnica da inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento das faces laterais das vigas, e que foram ensaiadas no âmbito do programa experimental apresentado nas secções 2 e 3.

A análise comparativa entre valores experimentais e valores analíticos apresentada na Tabela 23 e na Figura 118 permite verificar, desde logo, que apenas na viga 2S-3LI45 é que se verificou uma situação indesejável em termos de segurança. Com efeito, o valor analítico da referida viga, que pode ser considerado como o valor esperado, não foi atingido experimentalmente. Relativamente à viga 2S-8LI45, considerando $\varepsilon_{fe}^{max} = 6.6\text{‰}$, o valor analítico também foi superior ao experimental. Relembre-se que nesta viga o valor médio da extensão no laminado instrumentado, para a situação de máxima extensão no CFRP, foi de 3.87‰.

Considerando o valor da máxima extensão admissível no CFRP, $\varepsilon_{fe}^{max} = 5.9\text{‰}$, conclui-se que a relação $V_f^{exp.}/V_{fd}^{ana.}$ em termos médios vale 1.53. Se for considerado $\varepsilon_{fe}^{max} = 6.6\text{‰}$ a relação $V_f^{exp.}/V_{fd}^{ana.}$ vale 1.39. Desta forma, pode-se referir que ambas as soluções analisadas conduzem a resultados satisfatórios. A solução em que foi considerado $\varepsilon_{fe}^{max} = 6.6\text{‰}$, por estar associada directamente às vigas que foram ensaiadas, proporcionou uma melhor aproximação entre os valores analíticos e os valores experimentais.

6. CONCLUSÕES

7. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho expressam o seu agradecimento à Degussa Construction Chemicals Portugal pelo fornecimento do adesivo e das resinas, à S&P Reinforcement pelo fornecimento dos laminados e mantas de CFRP e à Unibetão (Braga) pelo fornecimento do betão. Os agradecimentos são estendidos à empresa Empreiteiros Casais pela colaboração prestada na concepção das vigas e na execução dos reforços de CFRP. Um agradecimento especial ao Miguel Freitas, finalista da licenciatura em Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela colaboração na campanha de ensaios levada a cabo para a realização deste trabalho. Um agradecimento, também, aos funcionários do Laboratório de Ensaios de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil

da Universidade do Minho, António Matos, Marco Jorge e José Gonçalves. Os autores manifestam também os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/ECM/59033/2004.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 440, 2002, *“Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”*, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, Maio, 118 pp.
- ACI Committee 318, 2002, *“Building code requirements for structural concrete and commentary”*, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 118.
- Adhikary, B.B., Mutsuyoshi H. e Ashraf, M., 2004, *“Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer Sheets with Bonded Anchorage”*, ACI Structural Journal, Vol. 101, Nº 5, September-October, pp. 660-668.
- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Riskalla, S.H. and Triantafillou, T.C., 2002, *“Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-art Review”*, Journal of Composites for Construction, Vol. 6, Nº2, May, pp. 73-87.
- Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Dias, S.J.E., Ferreira, D.R.S.M. e Fortes, A. S., 2003, *“Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão”*, Vº Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, Brasil.
- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. e Fortes A.S., 2005, *“Near surface mounted technique for the flexural and shear strengthening of concrete beams”*, Proceedings of the INCOS 05 - International Conference on Concrete for Structures, Coimbra, Portugal, Julho 7-8, pp. 229-236.
- Barros, J.A.O. e Dias, S.J.E., 2005, *“Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beam”*, Artigo aceite para publicação na Revista Cement & Concrete Composites.
- Belbetões, 2002, *“Remodelação do edifício do Marquês de Pombal, nº12, Lisboa”*, Ficha técnica.
- Bettor MBT, 2003, *“BeTTor MBT - MBrace: Sistema integral para refuerzo de estructuras”*, Bettor MBT - Productos Químicos para la Construcción, Abril, 8 pp.
- Blaschko, M. and Zilch, K., 1999, *“Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits”*, Proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, ICCM 12, Paris, France (CD-ROM).

- Bonaldo, E., Barros, J.A.O., Lourenço, P.B., 2005, “Concrete slabs strips reinforced with exoxy-bonded carbon laminate into slits”, Proceedings of ConMat’05 and Mindess Symposium, Vancouver, Canada (CD-ROM).
- Bousselham A. e Chaallal, O., 2004, “*Shear Strengthening Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research*”, ACI Structural Journal, Vol. 101, Nº 2, March-April, pp. 219-227.
- Carolin, A., 2003, “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia, June, 190 pp.
- Casadei, P., Galati, N., Parreti, R. e Nanni, A., 2003, “*Strengthening of a bridge using two FRP technologies*”, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI Internacional SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, American Concrete Institute, pp. 219-237.
- Chaallal, O., Nollet, M.J. e Perraton D., 1998, “*Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP Strips*”, Journal of Composites for Construction, vol. 2, nº2, May, pp. 111-113.
- Chaallal, O., Shahawy, M. e Hassan M., 2002, “*Performance of Reinforced Concrete T-Girders Strengthened in Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Fabric*”, ACI Structural Journal, Vol. 99, nº 3, May-June, pp. 335-343.
- Chen, J.F. e Teng, J.G., 2003-a, “*Shear Capacity of FRP -Strengthened RC Beams: FRP debonding*”, Construction and Building Materials, vol. 17, pp. 27-41.
- Chen, J.F. e Teng, J.G., 2003-b, “*Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture*”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, nº 5, May, pp. 615-625.
- Concrete Society, 2000, “*Design Guidance on Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials*”, Technical Report 55, The Concrete Society, London, UK, 70 pp.
- CSA-S806-02, 2002, “*Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*”, 1st ed., Canadian Standards Association, Toronto, Canada.
- Degussa Construction Chemicals Portugal, 2003, “Fichas técnicas MBrace Resin 50, MBrace Resin 55 e MBrace Resin 220”, Maio.
- De Lorenzis, L. e Nanni, A., 2001, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with-near surface mounted fiber-reinforced polymer rods*”, ACI Structural Journal, Vol. 98, nº 1, January-February, pp. 60-68.

- De Lorenzis, Laura, 2002, "*Strengthening of RC Structures with Near-Surface Mounted FRP rods*", PH. D. Dissertation of Civil Engineering, Università Degli Studi di Lecce, Italy, May, 289 pp.
- Deniaud, C. e Cheng, J.J.R, 2001, "*Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Sheets*", ACI Structural Journal, Vol. 98, nº 3, May-June, pp. 386-394.
- Deniaud, C. e Cheng, J.J.R, 2003, "*Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Fiber-Reinforced Polymer Sheets*", Journal of Composites for Construction, vol. 7, nº4, November, pp. 302-310.
- Dias, S.J.E., 2001, "*Verificação Experimental do Reforço com CFRP de Estruturas de Betão à Flexão*": dissertação apresentada á Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Março, 203 pp.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2004-a, "*Materiais Compósitos no Reforço ao Corte de Vigas de Betão Armado*", Relatório Técnico 04-DEC/E-03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Fevereiro, 74 pp.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2004-b, "*CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado: investigação experimental e modelos analíticos*", Relatório Técnico 04-DEC/E-08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Maio, 109pp.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2004-c, "*Proposta de uma técnica de reforço ao corte com CFRP*", Revista Engenharia Civil • UM, Universidade do Minho, nº 21, Dezembro, pp.11-24.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2005, "*Reforço ao corte de vigas T de betão armado por inserção de laminados de CFRP*", Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005, Olinda, Recife, Brasil, 2-7 Setembro, Volume VII, pp. 445-461.
- El-Hacha, R. e Riskalla, S.H., 2004, "*Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures*", ACI Structural Journal, Vol. 101, Nº5, September-October, pp. 717-726.
- El-Hacha, R., Riskalla S.H. e Kotynia R, 2005, "*Modelling of Reinforced Concrete Flexural Members Strengthened with Near-Surface-Mounted FRP Reinforcement*", Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Seven Symposium, ,USA, pp. 483-490.
- Emmons P., Thomas, J. and Sabnis, G.M., 2001, "*New strengthening technology for blue circle cement silo repair and upgrade*", Proceedings of FRP workshop US-AID, Cairo, Egypt.

- EN 10002-1, 1990, "*Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*", 35 pp.
- Ferreira, D.R.S.M, 2000, "*Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono*", Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- fib - Bulletin 14, 2001, "*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*", technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, Fédération Internationale du Béton - fib, July, 130 pp.
- Fortes, A. S., 2004, "*Estruturas de Concreto submetidas à flexão reforçadas com laminados de CFRP colados em entalhes*", *PhD Thesis*, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, May, 213 pp.
- Funakawa, I., Shimono, K., Watanabe, T., Asada, S., and Ushijima, S., 1997, "Experimental Study on Shear Strengthening with Continuous Fiber Reinforcement Sheet and Methyl Methacrylate Resin," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium*, Vol. 1, Japan Concrete Institute, Japan, pp. 475-482.
- Hogue, T., Cornforth, R.C. e Nanni, A., 1999, "*Myriad convention center floor system reinforcement*", *Proceedings of the FRPRCS-4*, C.W. Dolan, S. Rizkalla and A. Nanni Editors, ACI, pp. 1145-1161.
- ISO 527-5, 1997, "*Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*", International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.
- JSCE, 2001, "*Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets*", Japan Society of Civil Engineers, Japão, Abril 2001.
- Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A. and Abdel Azis, M.I., 1998, "*Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural member*", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, nº 4, pp. 195-202.
- Khalifa, Ahmed, 1999, "*Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Advanced Composites*", PH. D. Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt.
- Khalifa, A. e Nanni A., 2000, "*Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites*", *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, nº2, July, pp. 165-174.

- Khalifa, A. e Nanni A., 2002, “*Rehabilitation Simply Supported RC Beams with Shear Deficiencies Using CFRP Composites*”, Construction and Building Materials, vol. 16, nº3, pp. 135-146.
- Mitsui, Y., Murakami, K., Takeda, K. and Sakai, H., 1998, “*A study on Shear Reinforcement of Reinforced Concrete Beams Externally Bonded with Carbon Fiber Sheets*”, Composite Interface, V. 5, Nº4, pp. 285-295.
- Miyauchi, K., Inoue, S., Nishibayashi, S. and Tanaka, Y., 1997, “*Shear Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with CFRP Sheet*”, Transactions of the Japan Concrete Institute, V.19, pp. 97-104.
- Nanni, A., Di Ludovico, M. and Parretti, R., “*Shear strengthening of a PC bridge girder with NSM CFRP rectangular bars*”, Advances in Structural Engineering, Vol. 7, Nº 4, 2004, pp.97-109.
- NP-ENV 206, 1993, “*Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*”, Norma Portuguesa, IPQ, Outubro.
- Pellegrino, C. e Modena, C., 2002, “*Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement*”, Journal of Composites for Construction, vol. 6, nº2, May, pp. 104-111.
- REBAP, 1983, “*Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*”, Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho, edição Porto Editora, Porto, 211 pp.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y., and Tanaka, T., 1996, “*Shear Reinforcing Effect of Carbon Fiber Sheet Attached to Side of Reinforced Concrete Beam*”, Advanced Composite Materials in Bridges, M.M. EL-Badry, ed., CSCE, Montreal, Quebec, Canada, pp. 621-637.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y., and Ono, S., 1997, “*Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Sheets*”, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium, Vol. 1, Japan Concrete Institute, Japan, pp. 499-506.
- Sena-Cruz, J.M. and Barros, J.A.O., 2004, “*Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete in structural strengthening*”, Journal of Composites for Construction, Vol. 8, Nº 6, pp. 519-527.
- Sena-Cruz, J. M., “*Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*”, PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 213 pp, 2004.
- Sika, 2000, “*Soluções com sistemas Sika: Sika® CarboDur® e Sika Wrap®. Reforço estrutural e sísmico.*”, Sika - Indústria Química, S.A., Junho, 16 pp.

- S&P Reinforcement, “*Design guide line for S&P FRP systems*”, S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland, 69 pp, 2002.
- Taerwe, L., Khalil, H., and Matthys, S., 1997, “Behavior of RC Beams Strengthened in Shear by External CFRP Sheets,” *Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium*, Vol. 1, Japan Concrete Institute, Japan, pp. 483-490.
- Taljesten, B., 1997, “Strengthening of Concrete Structures for Shear with Bonded CFRP-Fabrics”, *Proceedings of the USA-Canada-Europe Workshop on Bridge Engineering*, U. Meir and R. Betti, eds., Zurich, Switzerland, July 14-15, pp. 57-64.
- TML, 2004, Tokio Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Strain Gauges, <http://www.tml.jp>.
- Triantafillou T., 1998, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites*”, *ACI Structural Journal*, March-April, pp. 107-115.
- Triantafillou T. e Antonopoulos C.P., 2000, “*Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP*”, *Journal of Composites for Construction*, November, pp. 198-205.
- Uji, K., 1992, “*Improving Shear Capacity of Existing Reinforced Concrete Members by Applying Carbon Fiber Sheets*”, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, V.14, pp.253-266.
- Umuzu, K., Fujita, M., Nakai, H. and Tamaki, 1997, “Shear Behavior of RC beams with Aramid Fiber sheets”, *Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium*, Vol. 1, Japan Concrete Institute, Japan, pp. 491-498.

ANEXO A - Composição do betão e resultados de ensaios de caracterização dos materiais

Neste anexo apresentam-se:

1. Composição do betão utilizado para a concepção das vigas;
2. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para caracterização do betão;
3. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos aços das armaduras;
4. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos laminados de CFRP.

1. Composição do betão utilizado para a concepção das vigas.

Tabela A.1 - Composição do betão.

Material	Quantidades por m ³ de betão
Cimento I 42.5 R	275 kg (275 kg)
Brita 1 (4-6)	236 kg (231 kg)
Brita 2 (6-14)	387 kg (384 kg)
Brita 3 (14-20)	400 kg (399 kg)
Areia fina	478 kg (461 kg)
Areia média	425 kg (395 kg)
Aditivo CHRYSOPLAST 750	2.75 kg (395 kg)
Água	132 l (179 l)

Os valores entre parêntesis dizem respeito à composição teórica. A humidade medida para a areia fina foi de 3.8% e para a areia média foi de 7.2%.

2. Resultados dos ensaios de compressão uniaxial para caracterização do betão.

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (betão).

Referência do provete	Idade do betão (dias)	Tensão máxima de compressão (MPa)
CIL - 1	28	25.7
CIL - 2	28	27.3
CIL - 3	28	26.1
CIL - 4	28	25.0
CIL - 4	70 *	31.6
CIL - 5	70 *	30.8
CIL - 6	70 *	31.0
CIL - 6	70 *	30.8

* - Idade do betão à data dos ensaios das vigas.

3. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos aços das armaduras.

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial (aço).

Tensão (MPa)	φ6 (estribos)	φ12	φ16	φ25
Cedência	530	446	445	450
	536	441	444	439
	533	450	453	442
Máxima	595	568	563	580
	592	564	564	575
	589	561	556	568

4. Resultados dos ensaios de tracção uniaxial para caracterização dos laminados de CFRP.

Tabela A.4 - Resultados dos ensaios de tracção uniaxial nos provetes de laminado de CFRP.

Proвете	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura à tracção (MPa)
P1	*	2642.86 *
P2	168.9	2883.4
P3	170.2	2884.1
P4	167.2	2970.1
P5	164.8	3044.9
P6	161.7	2980.0

* - Problemas durante a fase final do ensaio.